

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Zjištění BH efektu u hlubokotažné oceli

Testing BH effect of deep drawn steel

Michal Herman

KSP – TP –

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran 54

Počet tabulek 16

Počet příloh 0

Počet obrázků 26

Datum: 24. 5. 2013

ZADÁNÍ BP

ANOTACE
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program:	B2341 – Strojírenství
Student:	Michal Herman
Téma práce:	Zjišťování BH efektu hlubokotažné oceli Testing BH effect of deep drawn steel
Číslo BP:	KSP-TP-
Vedoucí BP	Ing. Pavel Solfronk Ph.D.
Konzultant	Ing. Jiří Sobotka Ph.D.

Abstrakt:

Předmětem bakalářské práce je zjištění BH efektu hlubokotažné oceli a jeho testování dvěma metodami. První metodou je zkouška tahem, kterou se BH efekt běžně měří. Druhou metodou je zkouška podle Engelharta a Grosse, která se řadí mezi technologické zkoušky. Po vyzkoušení materiálu se porovnávají metody mezi sebou, která z nich je vhodnější pro naměření BH efektu.

Abstract:

The objective of this BA paper is the evaluation of the BH effect of deep drawn steel and it's testing using two methods. The first method is the draw test, which is usually used for measuring the BH effect. The second method is the Engelhart-Gross test, which falls within the range of technological tests. After the examination of the material, both methods are compared against each other in order to find out which one is better for measuring the BH effect.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 24. května 2013

.....
Michal Herman

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady tykající se zpracování bakalářské práce a za čas, který mi věnoval při konzultacích.

Obsah

1. Úvod	9
2. Teoretická část	10
2.1 Oceli používané v automobilovém průmyslu.....	10
2.1.1 Nízko-pevnostní oceli bez intersticií (Interstitial-free)	10
2.1.2 Běžná uhlíková ocel (Mild steel).....	10
2.1.3 IF HS (Interstitial free high strength)	10
2.1.4 Izotropní oceli	11
2.1.5 Mikrolegované oceli (HSLA – high strenght low alloy)	11
2.1.6 Dvoufázové oceli (Dual phase)	11
2.1.7 CP oceli (Complex phase)	11
2.1.8 Trip oceli (Transformation inducted plasticity)	12
2.1.9 Martenzitické oceli (Martenzic steel)	12
2.2 BH oceli.....	12
2.3 Zkouška pevnosti v tahu dle EN ISO 6892 - 1	15
2.4 Zkouška podle Engelhart a Grosse.....	21
3. Experimentální část	24
3.1 Cíle experimentu	24
3.2 Zkouška tahem.....	26
3.2.1 Příprava vzorků.....	26
3.2.2 Proces tahové zkoušky	28
3.2.3 Výsledky tahové zkoušky	30
3.2.4 Vyhodnocení zkoušky tahem	31
3.3 Zkouška podle Engelhart a Grosse.....	38
3.3.1 Příprava vzorků.....	38
3.3.2 Proces zkoušky podle Engelhart a Grosse	39
3.3.3 Výsledky zkoušky podle Engelhart a Grosse.....	42
3.3.4 Vyhodnocení zkoušky podle Engelhart a Grosse	43
4. Závěr	48
5. Seznam použité literatury	49
6. Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	50

Seznam použitých symbolů a značek

Označení	Popis	Jednotka
F	Síla	[N]
L	Délka tyče	[mm]
k	Součinitel délky tyče	[-]
S_0	Počáteční plocha příčného průřezu	[mm ²]
S	Aktuální plocha příčného průřezu	[mm ²]
L_0	Počáteční měřená délka	[mm]
L_c	Zkoušená délka tyče	[mm]
d_0	počáteční průměr tyče	[mm]
a_0	počáteční tloušťka tyče	[mm]
b_0	počáteční šířka tyče	[mm]
R	Smluvní napětí	[MPa]
\bar{R}	Skutečné napětí	[MPa]
ε	Poměrné prodloužení	[-]
R_U	Mez úměrnosti	[MPa]
R_x	Mez pružnosti	[MPa]
R_e	Mezi kluzu	[MPa]
R_{eH}	Horní mez kluzu	[MPa]
R_{eL}	Dolní mez kluzu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Nevýrazná mez kluzu	[MPa]
$R_{p0,005}$	Smluvní mez pružnosti	[MPa]
A	Tažnost	[%]
A_{80mm}	Tažnost tyče délky $L_0 = 80mm$	[%]
Z	Kontrakce	[%]
T	Míra hlubokotažnosti	[%]
F_{max}	Maximální síla při hlubokém tažení	[N]

$F_{\text{taž}}$	Tažná síla při hlubokém tažení	[N]
p_{max}	Maximální tlak při hlubokém tažení	[MPa]
$p_{\text{taž}}$	Tažný tlak při hlubokém tažení	[MPa]
K	Součinitel tažení	[-]
K_{max}	Maximální součinitel tažení	[-]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]

Zkratka	Význam
BH	Bake hardening, BH efekt umožňuje zvýšení meze kluzu při teplotách vypalování laku
BH0	Vzorky s BH efektem, bez předchozí deformace
BH2	Vzorky s BH efektem, s předchozím přetvořením o 2%
BH5	Vzorky s BH efektem, s předchozím přetvořením o 2%
ZM	Vzorky základního materiálu
IF	Oceli bez intersticií
MS	Martenzitické oceli
HSLA	High strength low alloy, mikrolegované oceli
CP	Complex phase, označení vícefázové oceli (komplexně fázová ocel)
DP	Dual phase, označení dvoufázové oceli
TRIP	Transformation induced Plasticity, označení oceli s transformačně indukovanou plasticitou
TWIP	Twinning induced Plasticity, označení oceli se základním mechanismem plastické deformace dvojčatěním
MILD	Mild steel, běžné uhlíkové oceli
Ppm	Parts per million, počet částic na jeden milion

1. Úvod

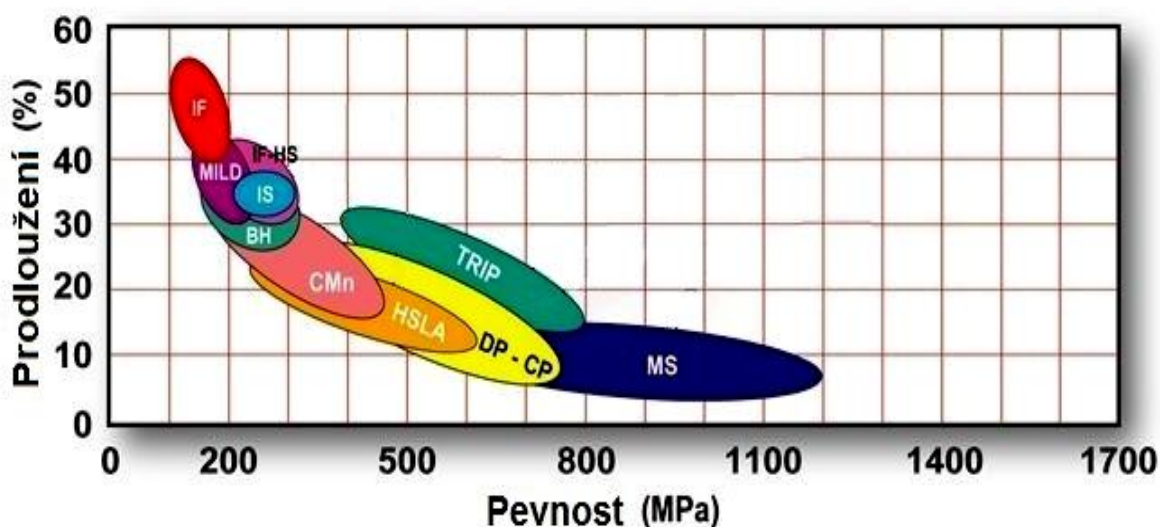
Na materiály pro výrobu karosérií osobních automobilů jsou kladeny vysoké požadavky, vedle dostatečné plasticity materiálu je nutná i vysoká absorpce energie při havárii vozidla a nezbytná odolnost materiálu proti korozi. Pro výrobu tvarově složitých dílů musí polotovary disponovat vysokými hodnotami parametrů plasticity, podmíněnými specifickými nároky na metalurgickou kvalitu a usměrněnou texturu v procesu tváření polotovaru. Rozličné požadavky na materiálové vlastnosti jednotlivých částí karosérie vedou k vývoji ocelí pro úzký okruh aplikací. Jednou z perspektivních kategorií materiálů pro karoserie v automobilovém průmyslu jsou tzv. BH oceli s BH („bake hardening“) efektem, u nichž je dosahováno zpevnění při teplotách vypalování laků, které byly vyvinuty v polovině osmdesátých let dvacátého století. Tyto oceli jsou určeny pro karosářské výlisky s vysokým stupněm přetvoření. [1]

Cílem této bakalářské práce je testovat BH efekt materiálu HX220BD ZF MCO dvěma metodami testů. První metodou je zkouška tahem dle normy EN ISO 6982-1 a druhou metodou je zkouška podle Engelharta a Grosse. Běžně se používá zkouška tahem a je otázkou, zdali bude zkouška podle Engelharta a Grosse stejně průkazná, jako tahová zkouška.

2. Teoretická část

2.1 Oceli používané v automobilovém průmyslu

Jde o materiály, u nichž je obecně žádoucí, aby vykazovaly současně co nejvyšší pevnostní i plastickou úroveň. Tyto vlastnosti je předurčují k použití pro nejrůznější automobilové komponenty, včetně karoserií. Podle typu dané oceli se jmenované parametry také liší. Závisejí zejména na chemickém složení matrice a na vlastním zpracování. Velmi důležitá je také co nejnížší hmotnost, protože tato má přímý dopad na spotřebu paliva a také na životní prostředí. Vybrané materiály jsou krátce charakterizovány dále (jsou seřazeny podle tažnosti). [2]



Obr. 2.1: Oceli používané v automobilovém průmyslu [3]

2.1.1 Nízko-pevnostní oceli bez intersticií (Interstitial-free)

Oceli bez intersticií obsahují velmi malé množství uhlíku ($C < 0,005\%$). To má za následek nižší hodnoty meze kluzu a naopak větší hodnoty plasticity. Z těchto důvodů se používají pro hluboké tažení. [4]

2.1.2 Běžná uhlíková ocel (Mild steel)

Běžné uhlíkové oceli mají v zásadě feritickou strukturu. V minulosti byly hojně používané při konstrukci automobilu, dnes již tak významnou roli nehrají. [4]

2.1.3 IF HS (Interstitial free high strength)

Stejně jako nízko-pevnostní bez intersticií obsahují malé množství uhlíku. Změnou je mikrolegování titanem, niobem nebo jejich kombinací. Tyto

prvky vyvážou intersticiální atomy uhlíku a dusíku na stabilní precipitáty. Struktura oceli je tvořena čistým feritem a vlastnosti oceli jsou funkcí velikosti feritického zrna. Nepřítomnost intersticií ovlivňuje mechanické vlastnosti oceli. Tyto oceli mají nižší mez kluzu, vysokou tažnost, vysoký koeficient normálové anizotropie a vysoký exponent deformačního zpevnění. Oceli jsou odolné vůči stárnutí, používají se pro extrémně hluboké tažení a jsou vhodné na výrobu velkých, tvarově složitých karosářských výlisků. [4]

2.1.4 Izotropní oceli

Izotropní oceli jsou oceli s plošnou anizotropií blízkou nule, tzn., že tyto oceli mají při lisování s jednoosou a dvouosou napjatostí výbornou tvářitelnost. [5]

2.1.5 Mikrolegované oceli (HSLA – high strenght low alloy)

Oceli mají nízký obsah uhlíku, podporující plasticitu. Nižší obsah uhlíku musí být kompenzován mikrolegujícími prvky (Nb, Ti, V) buď samostatně anebo v kombinacích., aby bylo dosaženo požadovaných pevnostních vlastností. Mikrolegující prvky vytvářejí nitridy, karbidy, resp. karbonitridy, které jsou schopny matici nejen zpevnit, ale i více, či méně zjemnit mikrostrukturu. Zjemnění pak přispívá ke snížení transitzní teploty. Daný typ ocelí se využívá v současné době na karoserie zhruba z 1 %. [2]

2.1.6 Dvoufázové oceli (Dual phase)

Jejich využití pro výrobu karoserií a dalších komponent odpovídá cca 74 %. Jde o oceli se základní feritickou maticí, která zajišťuje plasticitu a patřičná pevnostní úroveň je dosahována transformací zbytkového, stabilizovaného austenitu zpravidla na ostrůvky martenzitu. DP oceli mívají ve srovnání s předcházejícími typy ocelí vyšší obsah uhlíku (až 0.1%) a také zvýšené obsahy prvků, které jsou schopny stabilizovat austenit jako např. Mn. Také vyšší obsah křemíku (až 0.08 %) podporuje nejen tvorbu základní feritické matrice, ale i její zpevnění. Pro výrobu je také nutná patřičná rychlost ochlazování, která umožní rozpad austenitu v první fázi na cca 85 % feritu. Zbytek austenitu je pak stabilizován a posléze transformuje na martenzit M (event. bainit). [2]

2.1.7 CP oceli (Complex phase)

Mikrostruktura komplexně fázových ocelí obsahuje malé množství martenzitu, zbytkového austenitu a perlitu ve feriticko – bainitické matici (viz obr. 4). Pomalou rekrystalizací lze dosáhnout extrémního zjemnění zrna. Téhož efektu lze dosáhnout i precipitací mikrolegujících prvků jako je třeba Ti nebo Co. Mez pevnosti CP oceli se pohybuje v rozmezí 800 – 1000 MPa. CP

oceli se vyznačují vysokou absorpcí energie a zbytkovou deformační kapacitou. Ve srovnání s DP ocelí má výrazně vyšší mez kluzu při zachování stejné meze pevnosti v tahu. [2]

2.1.8 Trip oceli (Transformation induced plasticity)

TRIP ocele jsou velmi plastické, mají feriticko-bainitickou strukturu, hlavní legury Cr 9-13%, Ni 8-9%, dále Mo, Mn, Si. Velmi nízký obsah uhlíku. Teplota M_s je po rozpouštěcím žíhání pod nulou. Pro zvýšení M_s se intenzivně tváří a tím proběhne částečná martenzitická transformace. Dosahují pevnosti až 2000 MPa při tažnosti asi 80%. [4]

2.1.9 Martenzitické oceli (Martensic steel)

Mikrostruktura oceli je tvořena martenzitickou maticí s malým množstvím feritu nebo bainitu. V rámci skupiny vícefázových ocelí, MS oceli vykazují nejvyšší úroveň pevnosti v tahu. Mez pevnosti v tahu dosahuje hodnoty až 1700 MPa. [4]

2.2 BH oceli

BH oceli mají základní feritickou strukturu. Před lisováním mají nízkou hodnotu meze kluzu a vysoké parametry plasticity. S ohledem na použití BH ocelí je u těchto ocelí velmi důležitá povrchová úprava, mimo jiné lakování. Během vypalování laku dochází k deformačně-tepelnému stárnutí a nárůstu meze kluzu o 30-70 MPa. Díly karoserie vyrobené z BH ocelí mají poté dovolené vyšší maximální zatížení a vyšší odolnost vůči škrábancům, rýhám a otlacení. Proto se používají na viditelné části karoserie vozu, jako jsou kapoty, dveře či střechy nebo na strukturní části, jako je například podvozek.

Zpevnění ocelí je docilováno po zpracování, resp. kontrolovaném procesu žíhání. Technologie BH ocelí je v podstatě proces nízkoteplotního statickonapětového stárnutí, který zahrnuje interakci mezi rozpuštěnými uhlíkovými atomy a dislokacemi generovanými během tváření. Stárnutí automobilových komponent probíhá při teplotě okolo 170°C. Dochází ke zvyšování úrovně meze kluzu vlivem dvou odlišných zpevňovacích procesů, a to:

a) vlivem stádia vzniku Cottrelvy atmosféry na dislokacích

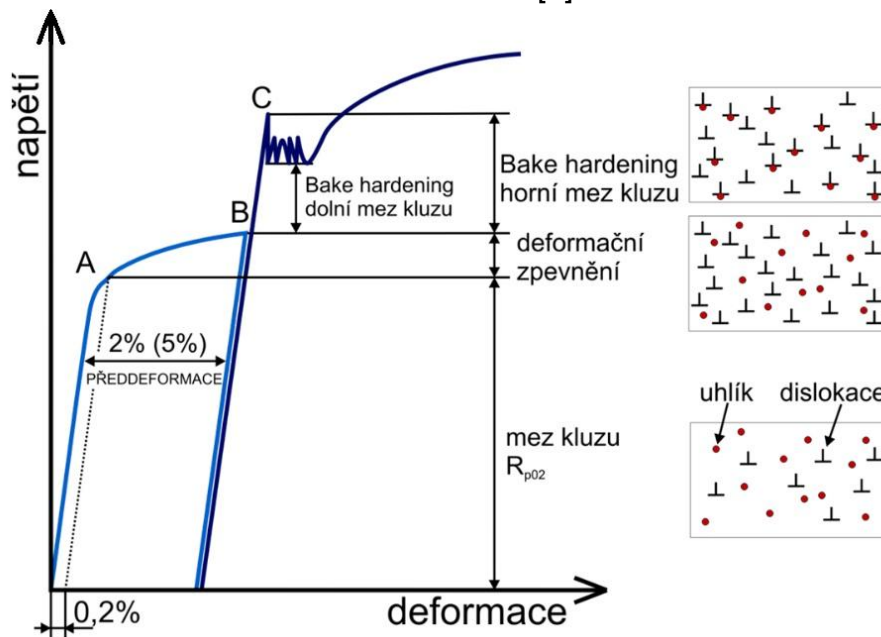
b) a vlivem precipitace karbidů díky existenci Cottrelvy karbidické atmosféry.

Stádium zpevnění závisí na množství rozpuštěného uhlíku drženého v maticí původní oceli. U nízkouhlíkových ocelí proces velmi zřídka přechází z prvního stádia a) do druhého b). Maximální nárůst meze kluzu vlivem

Cottrelovy atmosféry se pohybuje u nízkouhlíkových ocelí okolo 30 MPa za předpokladu 1 až 2 ppm rozpuštěného uhlíku v matici. Uvedený nárůst meze kluzu je nízký, a proto je nutno realizovat kroky pro další přírůstek BH zpevnění. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby:

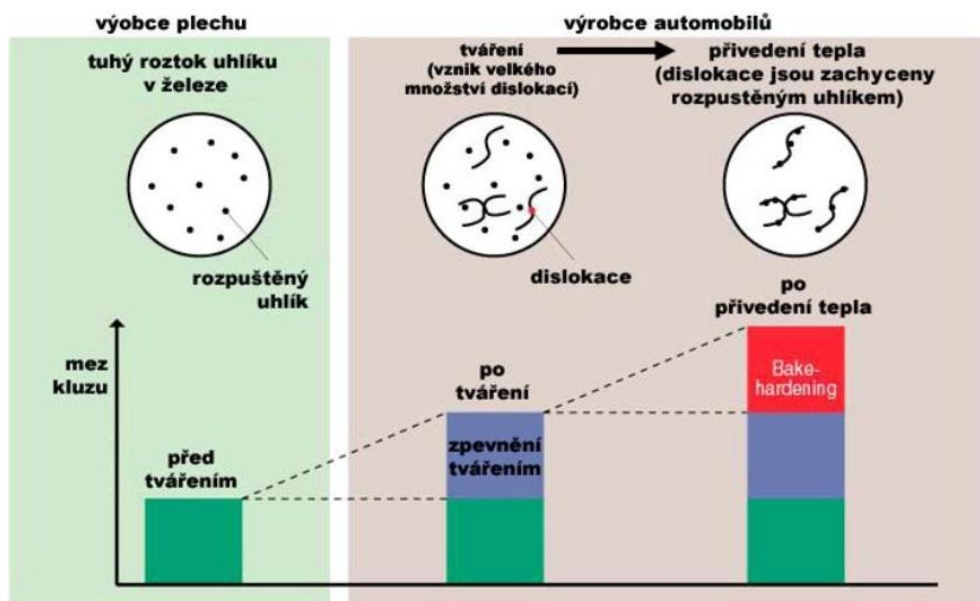
- a) zvětšením velikosti zrna během kontinuálního žíhání
- b) zvýšením rychlosti ochlazování okamžitě po realizaci kontinuálního žíhání.

Různá velikost zrn ovlivňuje distribuci uhlíku mezi vnitřní částí zrna a jeho hranicí vlivem měnícího se počtu segregačních míst na hranicích zrn. S rostoucí velikostí zrn se snižuje plocha hranic zrn a celkové množství uhlíku, které může být koncentrováno na hranicích zrn, se takto snižuje, ve srovnání s maticí s jemnozrnnou strukturou. To má za následek nárůst zvýšení rozpuštěného uhlíku v matici (uvnitř zrn). Zvýšením rychlosti ochlazování ze žíhací teploty se zabrání difúzi uhlíkových atomů na hranice zrn a tím se udrží zvýšená saturace uhlíku v kovové matici. [2]



Obr. 2.2: Proces pohybu uhlíku BH efektu. [6]

Ve levé části na obr. 2.2 je vidět zjednodušený model struktury, kde je rozpuštěný uhlík. Po deformaci dochází ke zvýšení počtu dislokací a v poslední fázi při vypalování laku, uhlík zablokuje dislokace.



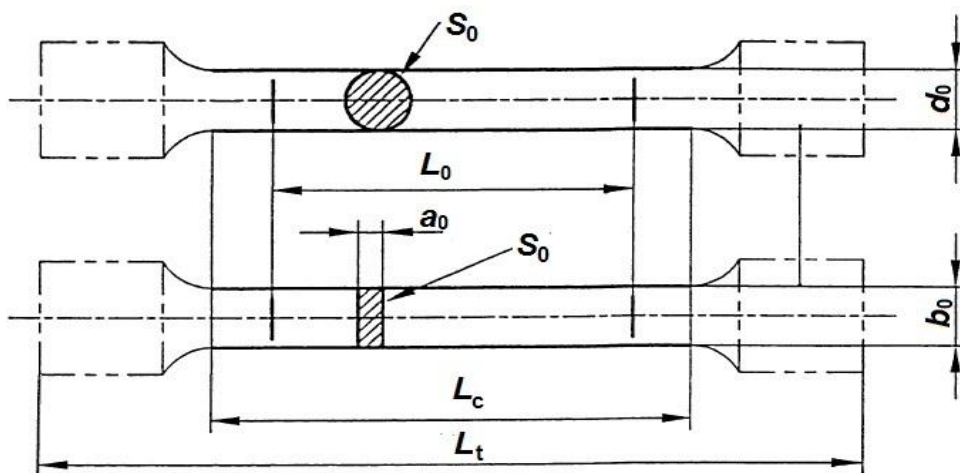
Obr. 2.3: Nárůst meze kluzu během procesu zpracování BH oceli [6]

2.3 Zkouška pevnosti v tahu dle EN ISO 6892 - 1

Tato zkouška má ze všech statických mechanických zkoušek největší význam a je pokládána za základní zkoušku každého materiálu.

Provádí se za okolní teploty mezi 10 °C a 35 °C, pokud není stanoveno jinak. V arbitrážních případech musí být zkoušky provedeny při teplotě 23 °C ± 5 °C.

Zkušební vzorkem je válcová (na obrázku 2.4 nahoře) nebo plochá (na obrázku 2.4 dole) tyč, jejíž konce jsou většinou zesíleny a vhodným způsobem upraveny pro uchycení v čelistech zkušebního stroje. Válcové tyče jsou používány přednostně, ploché tyče se zhotovují pouze při zkoušení materiálu ve tvaru tenkých plechů a pásů, ze kterých není možno zhotovit válcovou zkušební tyč.



Obr. 2.4: Základní tvary zkušebních tyčí [8]

Tyče se upínají mezi čelisti zkušebního, takzvaného trhačího, stroje. Zkušební vzorky jsou zatíženy dvěma stejně velkými silami (F), působícími tahem v podélné ose vzorku. Zatěžující síla se vyvozuje většinou hydraulicky, u menších strojů také mechanicky (například pomocí šroubu a matice). Stroj je vybaven ukazatelem zatěžující síly a zařízením pro grafický záznam síly a deformace.

Zkušební tyče, u kterých je počáteční měřená délka vztažena k počáteční ploše příčného průřezu podle rovnice $L = k\sqrt{S_0}$, se nazývají poměrné zkušební tyče. Mezinárodně přijata hodnota součinitele k je 5,65. Počáteční měřená délka musí být nejméně 20 mm. Jestliže je počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče příliš malá na to, aby hodnota součinitele $k = 5,65$ splnila tento požadavek, může se použít hodnota vyšší (přednostně 11,3), nebo nepoměrná zkušební tyč.

V případě nepoměrných zkušebních tyčí nezávisí počáteční měřená délka (L_0) na počáteční ploše příčného průřezu (S_0).

Poměrné zkušební tyče:

$$L_0 = 10 \cdot d_0 \text{ - u dlouhých tyčí} \quad (1)$$

$$L_0 = 5 \cdot d_0 \text{ - u krátkých tyčí} \quad (2)$$

U plochých tyčí je měřená délka odvozena z válcové tyče stejného průřezu a vypočte se podle vzorců (3) a (4):

$$L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0} \text{ - u dlouhých tyčí} \quad (3)$$

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0} \text{ - u krátkých tyčí} \quad (4)$$

kde S_0 je průřez tyče.

Nepoměrné zkušební tyče:

Tab. 2.1: rozměry nepoměrných tyčí [8]

Druh zkušební tyče	Šířka b_0	Počáteční měřená délka L_0	Zkoušená délka L_c	Volná délka mezi čelistmi u zkušebních tyčí s rovnoběžnými stranami
1	12,5±0,09	50	75	87,5
2	20± 105	80	120	140

Záznamové zařízení trhačního stroje vytvoří diagram závislosti prostého prodloužení ΔL zkušební tyče, vyjádřené vztahem:

$$\Delta L = L - L_0 \quad (5)$$

kde L je délka měřené části tyče v daném okamžiku zkoušky, na zatěžující síle F .

Protože síla F a prosté prodloužení ΔL jsou závislé na rozměrech zkušební vzorku, je vhodnější posuzovat změřené výsledky pomocí poměrných hodnot, to je napětí (poměru zatěžující síly k zatěžované ploše průřezu) a poměrného prodloužení (prodloužení délkové jednotky měřené délky). Pro určení skutečného napětí v libovolném okamžiku zkoušky by bylo třeba znát skutečnou plochu průřezu v tomto okamžiku. Tyč se totiž se zatěžováním nejen prodlužuje, ale také zužuje, její průřez se z původní hodnoty S_0 zmenšuje. Zpočátku probíhá zúžení rovnoměrně v celé délce tyče. Později se v některém místě začne tyč zužovat výrazněji, než jinde. Tvoří se tak zvaný krček, ve kterém později dojde k prasknutí tyče.

Označíme-li velikost plochy průřezu v daném okamžiku S , je skutečné napětí dáno vztahem (6).

$$\bar{R} = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

Běžné zkušební stroje však změnu příčných rozměrů a tedy ani plochy průřezu nejsou schopny zaznamenat.

Z uvedených důvodů je zavedena veličina označená „smluvní napětí“, vyjádřená vztahem (7):

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

Protože je vždy $S < S_0$, je vždy $\bar{R} > R$.

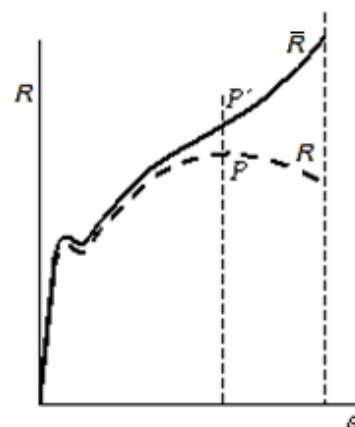
Poměrné prodloužení je dáno vztahem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} [\%] \quad (8)$$

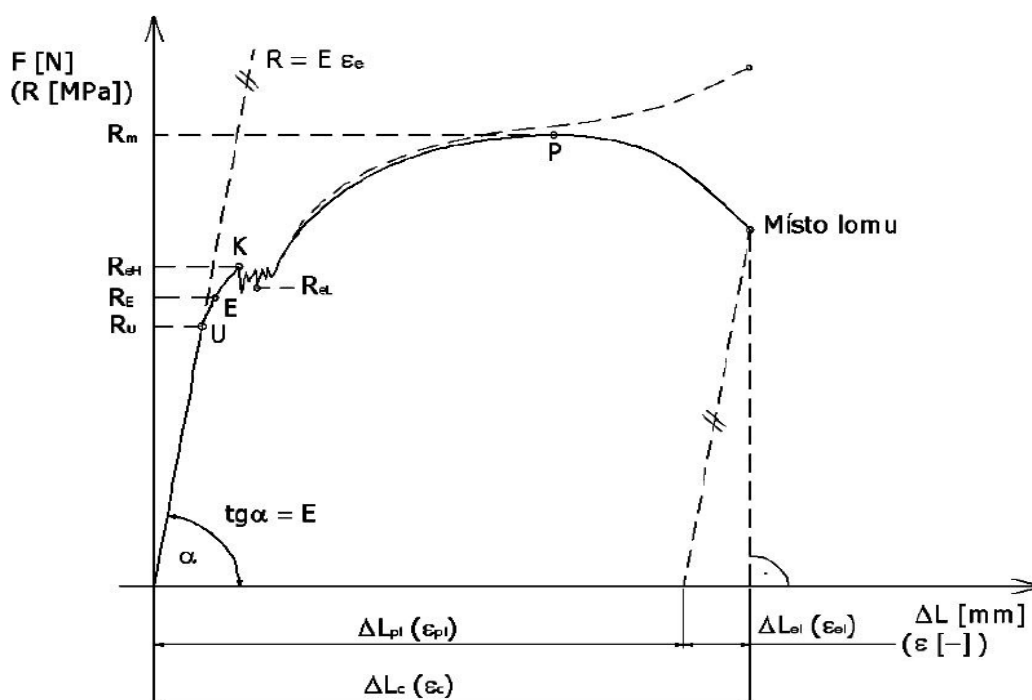
Je zřejmé, že smluvní napětí R i poměrné prodloužení ε jsou přímo úměrné zatěžující síle F a prostému prodloužení ΔL . Proto je možno v příslušném měřítku z diagramu zakresleného trhacím strojem odečítat i poměrné hodnoty. Protože diagram neurčuje průběh skutečného napětí, ale pouze napětí smluvního, nazývá se diagramem smluvním.

Srovnání průběhu skutečného a smluvního napětí během zkoušky je naznačeno na obrázku 2.5. Tím je také vysvětlena skutečnost, proč zdánlivě zkoušený vzorek praská při menším napětí, než je napětí příslušející vrcholu smluvního diagramu R - ε .

Obrázek 2.6 znázorňuje záznam zkoušky houževnaté oceli. Na záznamové čáře je několik charakteristických bodů. Od počátku zkoušky až do bodu U (mez úměrnosti) je závislost mezi zatížením a deformací lineární, za tímto bodem se čára zakřivuje. Do bodu E (mez pružnosti) vznikají v materiálu pouze pružné deformace. Při dosažení bodu K (mez kluzu) dojde ke zvláštnímu jevu. Až dosud bylo pro zvětšení deformace nutno zvětšit zatížení. Zde je zřejmé, že za bodem K bude po určitou dobu probíhat deformace, i když se zatížení bude snižovat. Později však opět čára začíná stoupat. Bod P (mez pevnosti) odpovídá vrcholu záznamové čáry. V tomto okamžiku se začíná v některém místě tyč prudce zužovat, vzniká krček. V posledním bodě dochází k prasknutí vzorku, lomu.



Obr. 2.5: Rozdíl mezi smluvním a skutečným napětím [10]



Obr. 2.6: Graf zkoušky houževnaté oceli [12]

Zmíněným bodům odpovídají charakteristická (smluvní) napětí, nazvaná mezemi:

- mez úměrnosti v tahu R_U je největší smluvní napětí, při kterém je deformace úměrná napětí (platí Hookův zákon $R = E \cdot \epsilon_{el}$)
- mez pružnosti R_x je výrazně zpřísněná mez kluzu, která se určuje pouze u materiálů s nevýraznou mezí kluzu. Index $x < 0,2$ např. 0,01 označuje maximální povolenou trvalou deformaci 0,01% L_0 .

$$R_x = \frac{F_x}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

- mez kluzu (průtažnosti) v tahu R_e je smluvní napětí, při jehož dosažení probíhají po určitou dobu deformace, aniž je nutno zvyšovat zatížení; z hodnoty meze kluzu se u ocelí zpravidla určuje dovolené napětí v tahu. U ní se ještě někdy rozlišuje horní mez kluzu R_{eH} a dolní mez kluzu R_{eL} .

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (12)$$

Nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2}$ se určuje ze síly odpovídající trvalé absolutní deformaci $\Delta L = 0,2\% L_0$ (viz. obr. 2.8):

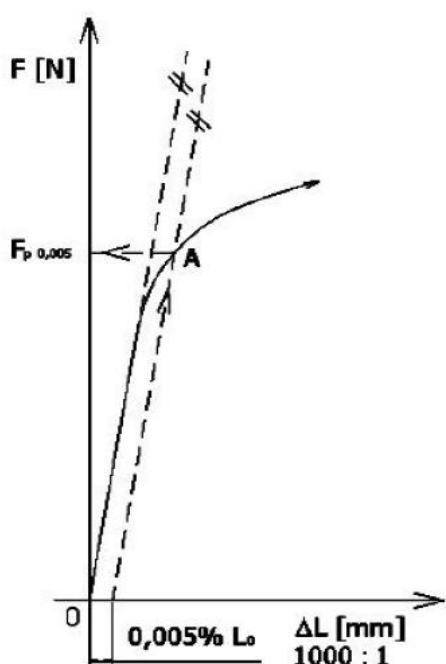
$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (13)$$

- mez pevnosti v tahu R_m je smluvní napětí, odpovídající největšímu zatížení $F_{\max} \equiv F_m$, které předchází porušení tyče.

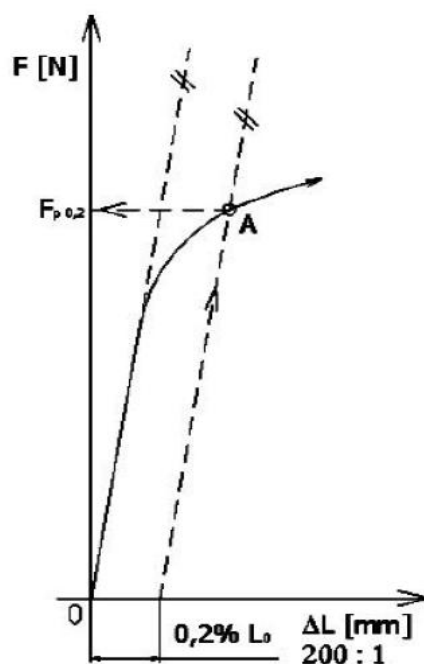
$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (14)$$

Na rozdíl od meze úměrnosti, meze kluzu a meze pevnosti není mez pružnosti v diagramu tahové zkoušky vyznačena žádným zřetelným bodem. Její experimentální zjišťování hledáním napětí odpovídajícího definici meze pružnosti je velmi zdoluhavé. Proto je podle dohody za mez pružnosti považováno smluvní napětí, které vyvodí trvalé prodloužení zkušební tyče rovné 0,005 % měřené délky L_0 . Takto určená mez pružnosti se označuje $R_{p0,005}$ (obr. 2.7).

Tvrďší oceli nemají zřetelnou ani mez kluzu. Proto se u nich udává smluvní mez kluzu. Je definována (podobně jako smluvní mez pružnosti) jako napětí, které vyvodí trvalé prodloužení zkušební tyče rovné 0,2 % měřené délky L_0 (obr. 2.8). Je označována $R_{p0,2}$.



Obr. 2.7. Určení meze pružnosti $R_{p0,005}$ [12]



Obr. 2.8. Určení meze pružnosti $R_{p0,02}$ [12]

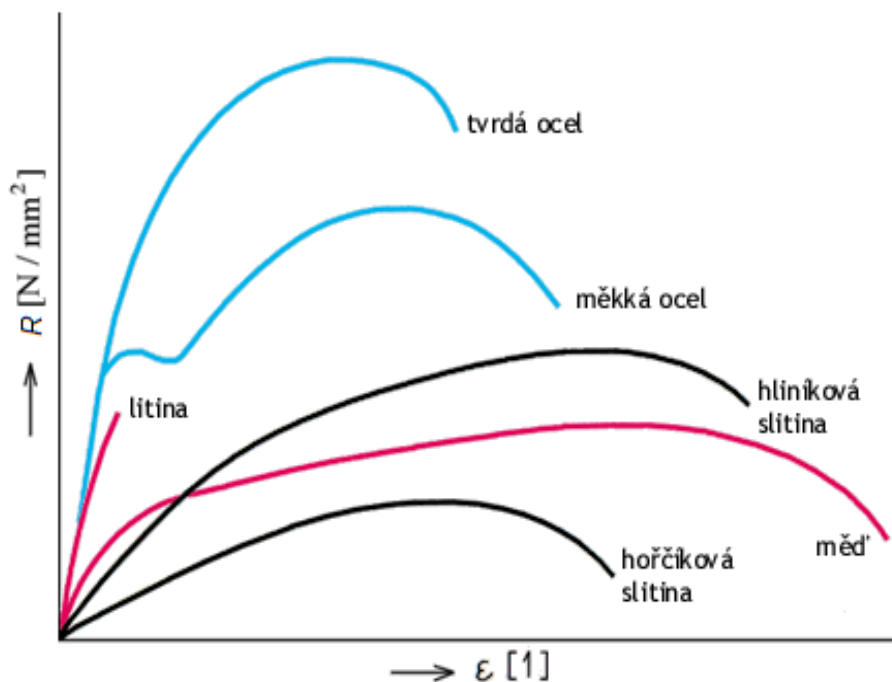
Trvalá složka poměrného prodloužení v okamžiku přetržení se nazývá tažností materiálu. Je označována A , udávána v procentech původní měřené délky a platí pro ni vztah:

$$A = 100 \cdot \varepsilon_u = 100 \cdot \frac{\Delta L_u}{L_0} = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} [\%] \quad (15)$$

kde $\Delta L_u = L_u - L_0$ je absolutní přírůstek původní měřené délky po přetržení.

Další udávanou hodnotou je kontrakce neboli poměrné zúžení. Stejně jako tažnost se zjišťuje po vyjmutí a složení obou částí vzorku a určuje ze vztahu:

$$Z = 100 \cdot \frac{\Delta S}{L_0} = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0} [\%] \quad (16)$$



Obr. 2.9: Křivky různých materiálů [9]

Tvrdé a křehké kovy, jako například pevné druhy ocelí nebo litina, vykazují při tahové zkoušce velmi malé celkové prodloužení. [8][9][10][12]

2.4 Zkouška podle Engelharta a Grosse

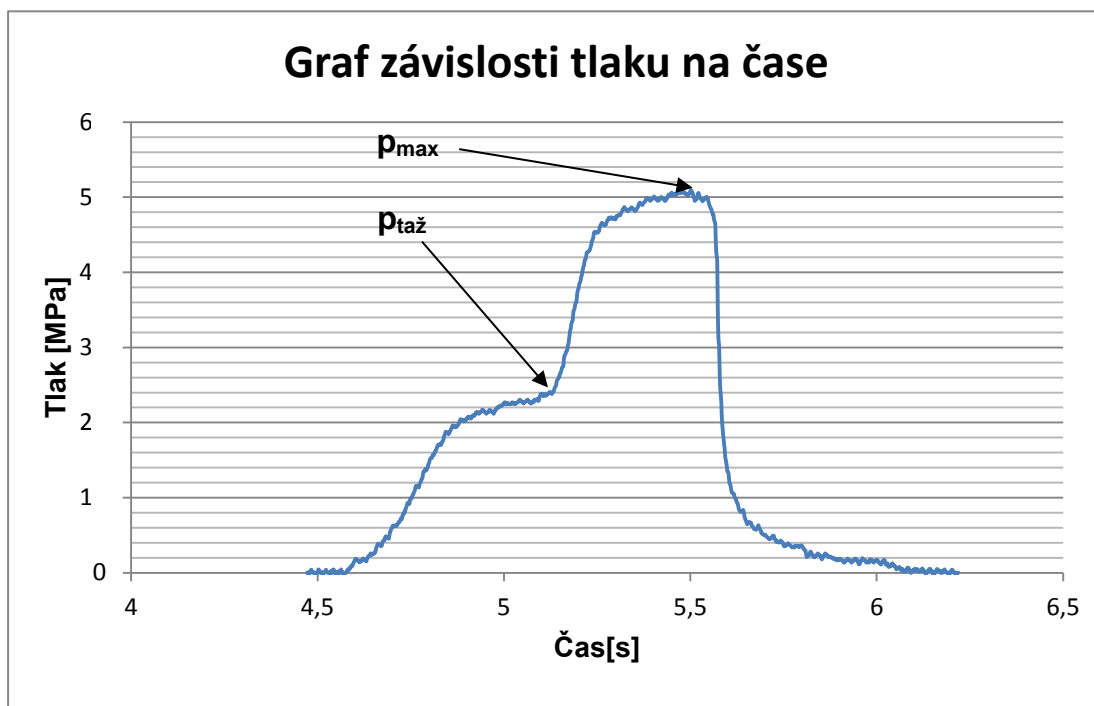
Jedná se o technologickou zkoušku, kdy se zkouší tvářitelnost. Zkouška probíhá za podobných podmínek jako samotný tvářecí proces.

Při tomto testu je měřen záznam tažné síly (tlaku) při zhotovení kalíšku.

Zkušební vzorky jsou pásy z tenkého plechu o šířce 60mm. V první fázi je z pásu vystřižen rondel o \varnothing 51,9mm (\varnothing 51,9mm – malým přístřihem a \varnothing 59,9 mm – velkým přístřihem). Poté se táhne s přidržovačem až do překročení tažné síly $F_{taž}$. Zbývající část příruby je poté sevřena přidržovačem a tažník se pohybuje až do úplného odtržení dna kalíšku, při tažné síle F_{max} . Míru hlubokotažnosti vyjadřuje hodnota T , vypočtená podle vztahu (17). [11]

$$T = \frac{F_{max} - F_{taž}}{F_{max}} \cdot 100 [\%] \quad (17)$$

Na obrázku lze vidět místa, jak se určuje síla F_{max} (respektive p_{max}) a síla $F_{taž}$ ($p_{taž}$). F_{max} je maximální síla, která byla dosažena během zkoušky a síla $F_{taž}$ je síla, které bylo dosaženo při tažení bez druhého přidržovače.



Obr. 2.10: Graf závislosti tlaku na čase

Dalším krokem je určení maximálního součinitele tažení K_{max} . Ten se určuje z grafu do kterého jsou potřeba hodnoty K , které se spočítají z podílu \varnothing přístřihu a \varnothing tažníku (viz vztah 18) a hodnoty tlaků (p_{max} a $p_{taž}$). Hodnoty K_1 a K_2 slouží jako souřadnice osy x, ke každému součiniteli náleží dvě hodnoty tlaků p_{max} (průměr všech hodnot p_{max}) a $p_{taž}$ (průměry pro malý a velký přístřih se průměrují zvlášť). Hodnotami maximálních a tažných tlaků se proloží

přímky, a kde se tyto přímky protnou, tam leží hodnota maximálního součinitele tažení. Součinitel K_{\max} lze tedy určit graficky, ale i početně, je to průsečík dvou přímek.

Určení součinitele tažení:

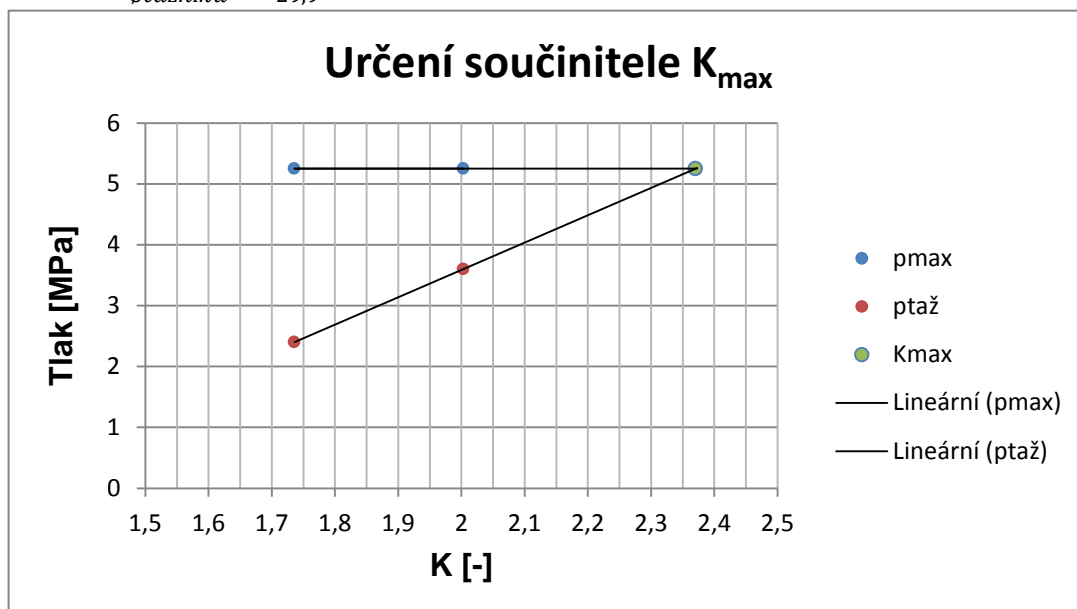
Přístřihy: $-\varnothing 51,9\text{mm}$

$-\varnothing 59,9\text{ mm}$

Tažník: $-\varnothing 29,9\text{ mm}$

$$K_1 = \frac{\varnothing_{\text{přístřihu}}}{\varnothing_{\text{tažníku}}} = \frac{51,9}{29,9} = 1,735 \quad (18)$$

$$K_2 = \frac{\varnothing_{\text{přístřihu}}}{\varnothing_{\text{tažníku}}} = \frac{59,9}{29,9} = 2,003 \quad (19)$$

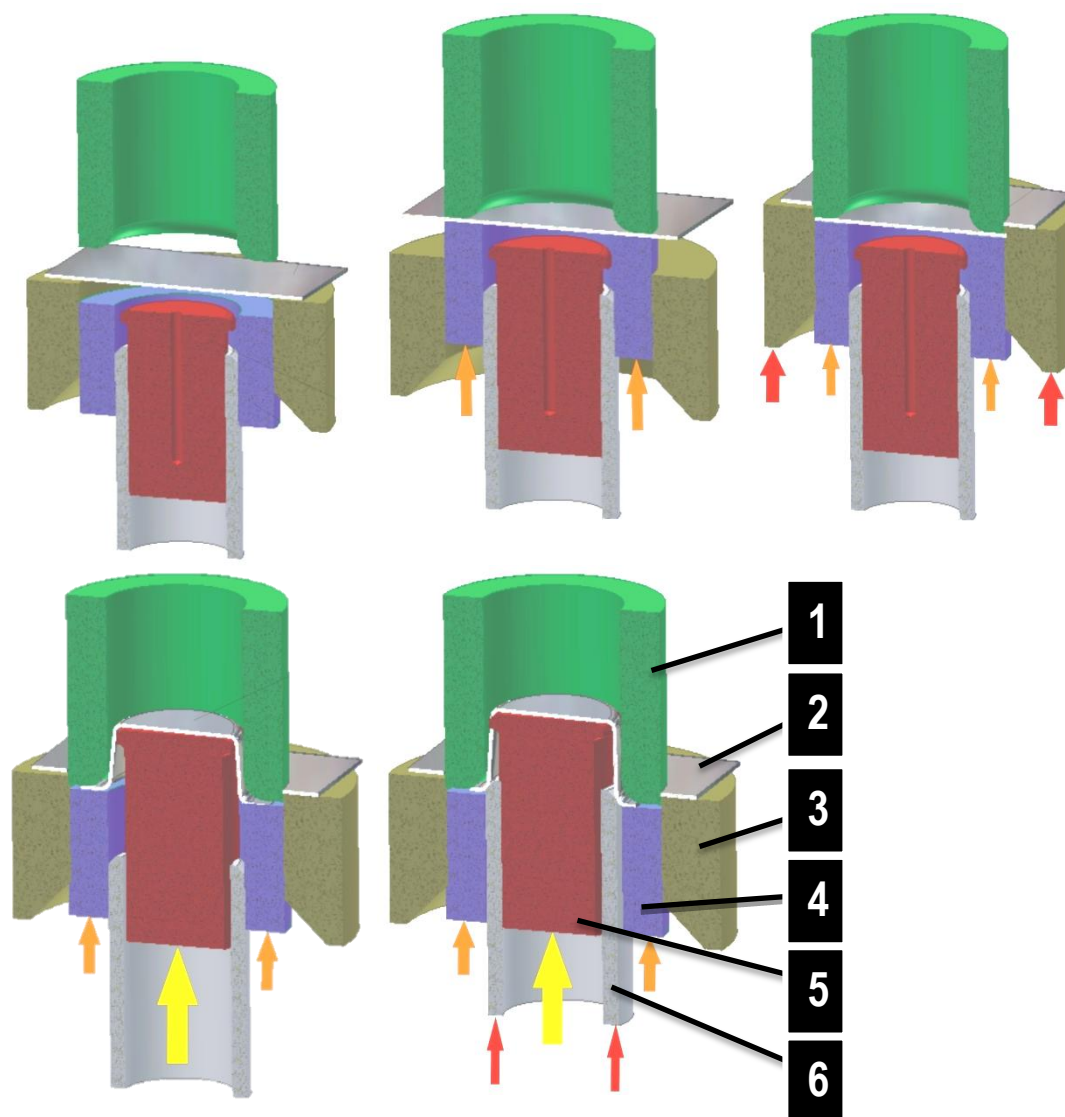


Obr. 2.11: Graf závislosti tlaku a součinitele K



Obr. 2.12: Zkušební stroj v laboratořích

Na obrázku 2.14 je naznačen pohyb jednotlivých částí stroje, v průběhu zkoušky.



Obr. 2.13: 1 – střižník + tažnice, 2 – vzorek, 3 – střižnice, 4 – první přidržovač, 5 – tažník, 6 – druhý přidržovač [13]

V první fázi se vyjede přidržovač proti střižníku a přidrží plech. Poté vyjede střižnice a vzorek vystřihne. V další fázi nastává tažení. Při zvýšení síly se zapojí i druhý přidržovač a tažník táhne do doby, než se vzorek poruší.

3. Experimentální část

3.1 Cíle experimentu

Cílem bakalářské práce je testovat BH efekt materiálu HX220BD ZF MCO dvěma metodami testů. První je zkouška tahem a druhou je zkouška podle Engelharta a Grosse. Testuje se při zadaných parametrech: teplota 180°C, doba tepelného zatížení 20 minut a předchozí deformace. Tato teplota a doba zatížení nejsou náhodné, simulují tepelné zatížení v praxi při vypalování laku v automobilovém průmyslu.

Testy byly provedeny při:

- 0% deformaci
- 2% deformaci
- 5% deformaci

Popis experimentu:

Všechny vzorky se nastříhaly na příslušné tvary. Základní materiál se natrhal na trhačím stroji, aby se zjistila hodnota smrštění po přetvoření u vzorků BH2 a BH5. Vzorky pro BH2 se nechaly přetvořit o 2% a vzorky BH5 o 5%. Takto připravené vzorky se nechaly tepelně zatížit teplotou 180°C po dobu 20 minut. Po této době se vyndaly ze sušárny a nechaly vychladit na vzduchu. Takto připravené vzorky se změřily a zhodnotily.

Vyhodnocení výsledků:

- a) Byla provedena statická zkouška tahem dle normy EN ISO 6892 - 1, kdy vypovídajícím výsledkem zkoušky je horní mez kluzu R_{eH}
- b) Byla provedena zkouška podle Engelharta a Grosse. Hlavní hodnotou pro vyhodnocení zkoušky byl maximální součinitel tažení K_{max}

Testovaný materiál HX220BD ZF MCO:

ZF – Zinko-železný povlak vytvořený tepelným zpracováním, při kterém železo difunduje skrz zinek. Povrch je šedý a matný.

M – minimální třpytivost – není viditelné pouhým okem.

CO – chemicky pasivováno a naolejováno pro zvýšení odolnosti proti korozi.

[7]

Tab. 3.1: Chemické složení testovaného materiálu

Označení			Chemické složení %							
Třída oceli		Označení použitelných povlaků	C max	Si max	Mn max	P max	S max	Al _{total}	Nb max	Ti max
Označení oceli	Číslo oceli									
HX220BD	1.0919	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +A	0,1	0,5	0,7	0,08	0,025	≤0,1	0,09	0,12

Tab. 3.2: Udávané mechanické vlastnosti testovaného materiálu

Označení			$R_{p0,2}$	$BH2$	R_m	$A_{80b, c}$	$r_{90c, d}$	n_{90}
Třída oceli		Označení použitelných povlaků	[MPa]	[MPa] min.	[MPa]	[%] min.	[-] min	[-] min.
Označení oceli	Číslo oceli							
HX220BD	1.0919	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +A	220 to 280	35	320 to 400	32	1,2	0,15

3.2 Zkouška tahem

3.2.1 Příprava vzorků

Pro zkoušku tahem jsou čtyři sady vzorků – základní materiál, BH0, BH2 a BH5. Každá sada je po třech vzorcích. Všechny byly vyrobeny v souladu s normou EN ISO 6892 – 1, stříháním v nástroji. Vzorky byly odebrány z plechu ve směru 0°.

ZM- vzorky se zkouší bez předchozího přetvoření a nebyly tepelně zatíženy

BH0- vzorky, které byly tepelně zatíženy bez předchozího přetvoření

BH2- vzorky, které byly tepelně zatíženy a přetvořeny o 2%

BH5- vzorky, které byly tepelně zatíženy a přetvořeny o 5%

Nejdříve bylo potřeba natrhat základní materiál, aby se zjistila hodnota smrštění materiálu pro následující přetvoření. Na mezi kluzu se zjistila hodnota 200 μm .

Vzorky BH2 a BH5 pro tahovou zkoušku se musely nejdříve přetvořit o 2% a 5%. Přetvoření probíhalo na trhacím stroji TIRatest 2300. Pomocí softwaru Lab.NET.TahTlak se mohlo přesně změřit protáhnutí o 2% délky. Zkušební tyč měla délku $L_0 = 80\text{mm}$, stroj se zastavil na hodnotě 1800 μm , 1600 μm jako 2% délky a 200 μm bylo kvůli délkovému smrštění materiálu. Takovýmto způsobem se pokračovalo na dalších dvou vzorcích.

Postup pro plechy označené jako BH5 je stejný jako pro BH2 pouze hodnota protažení je 5%. Takže hodnota, na které se stroj zastavil, je 4200 μm . 4000 μm jako 5% z délky L_0 a 200 μm je opět přidáno na smrštění vzorků.



Obr. 3.1: Porovnání délky vzorků pro tahovou zkoušku po přetvoření (ZM, BH2, BH5)

Všechny vzorky se změřily pomocí digitálního úchylkoměru MITUTOYO a hodnoty se zprůměrovaly. Průměrné hodnoty se vyplnily jako protokolové hodnoty v softwaru Lab.NET.TahTlak. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Naměřené hodnoty:

Tab. 3.3: Průměrné rozměry sad vzorků

	b_0 [mm]	a_0 [mm]
Průměr	20,151 \pm 0,004	0,655 \pm 0,003

Poté, co byly vzorky řádně připravené a přetvořené, tak se umístili do sušárny Venticell 222 na dobu 20 minut. V sušárně byla nastavena teplota 180°C. Po uplynulé době 20ti minut se vzorky vytáhly a nechaly ochladit na vzduchu.



Obr. 3.2: Sušárna Venticell 222



Obr. 3.3: Digitální úchylkoměr MITUTOYO

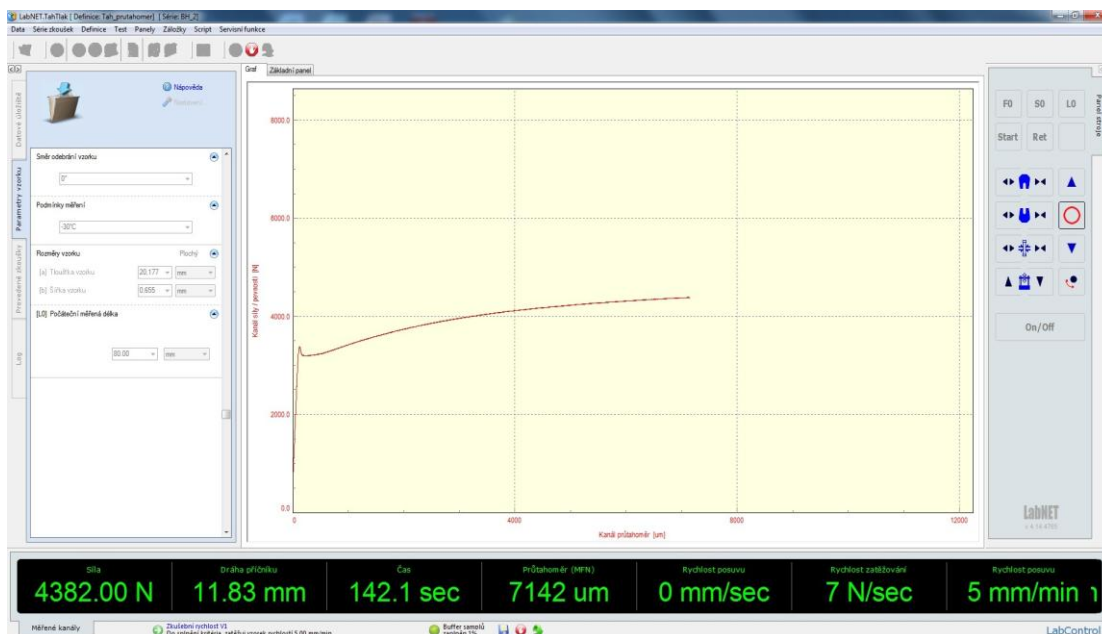
3.2.2 Proces tahové zkoušky

Tahová zkouška probíhala na trhacím stroji TIRatest 2300 (obr. 3.4), připojeného k počítači, podle normy. Celý proces byl ovládán softwarem LabNET, jehož pracovní prostředí je vidět na obr. 3.5. Na tomto obrázku na levé straně jsou vidět proměnné parametry vzorku (protokolové hodnoty), který je aktuálně měřen – tato záložka se vypisuje manuálně. Uprostřed je graf závislosti tažné síly na pohybu průtahoměru, který zaznamenává průběh zkoušky v reálném čase. Napravo jsou tlačítka, jimiž se přímo ovládá trhací stroj.



Obr.3.4 :Zkušební stroj
TIRatest 2300

Naměřená data se vyexportovala do tabulek a do souborů ve formátu *.csv. Tato data se zpracovala do grafů závislosti zatěžovací síly a protažení.

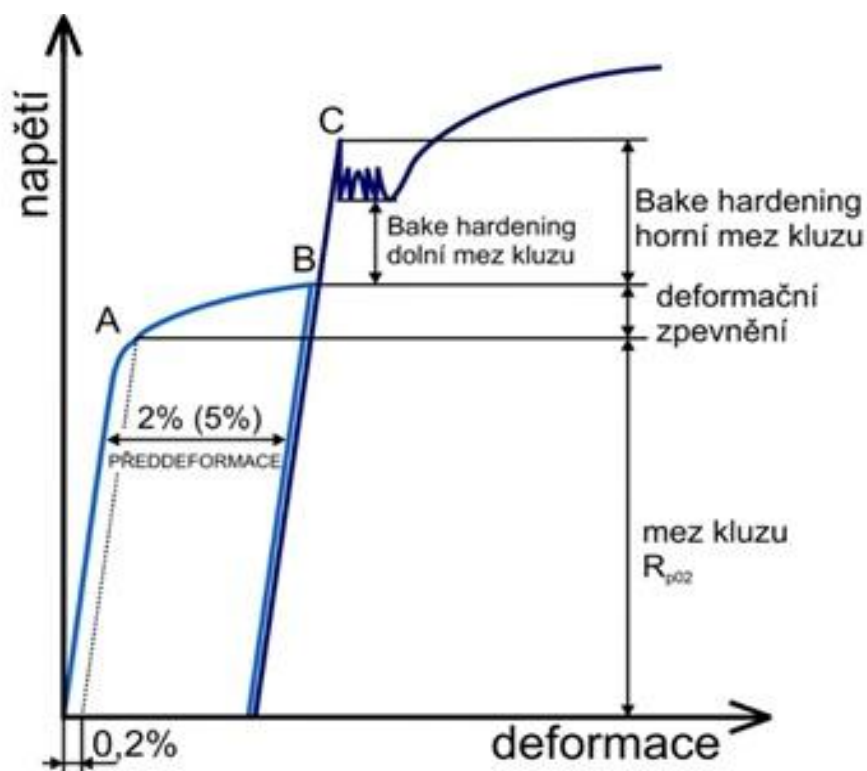


Obr. 3.5: Pracovní prostředí programu LabNET.TahTlak – nalevo jsou protokolové hodnoty, uprostřed aktuální graf zobrazující průběh zkoušky, napravo tlačítka ovládající zkušební stroj



Obr. 3.6: Základní vzorek a přetrhané vzorky

Na obrázku 3.7 je graf z tahové zkoušky pro vzorek BH2, na kterém je vidět grafické znázornění určování velikosti BH efektu a zpevnění. Hodnota zpevnění je rozdíl napětí, na kterém se stroj zastavil při přetvoření a horní meze kluzu R_{eH} . Hodnota BH efektu je rozdílem meze kluzu R_e tepelně zatíženého materiálu a hodnotou na které se stroj zastavil při přetvoření.



Obr. 3.7: Grafické znázornění určování vlivu BH efektu a zpevnění [6]

3.2.3 Výsledky tahové zkoušky

Naměřené výsledky se vyexportovaly z programu LabNET a jsou uvedeny v tabulkách, kde:

- $R_{p0.2}$ - smluvní mez kluzu určená z trvalé deformace pod zatížením (napětí, při kterém trvalá deformace dosáhne předepsané hodnoty, v tomto případě 0,2%)
- R_m - mez pevnosti a to je napětí odpovídající největšímu zatížení, předcházejícímu přetržení zkušební tyče
- A_{80mm} - tažnost
- E - modul pružnosti v tahu
- R_{eH} - horní mez kluzu
- R_{eL} - spodní mez kluzu

Základní materiál

Tab. 3.4: Mechanické vlastnosti nepřetvořeného nevypáleného materiálu

Č. měření	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]	E [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]
1	244,2	348,2	36	176424,1	256,7	243,7
2	243,4	348,3	36,3	171689	257,5	243,3
3	242,7	347,9	36	205237,5	258,1	242,3

Vzorky BH0

Tab. 3.5: Mechanické vlastnosti nepřetvořeného vypáleného materiálu

Č. měření	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]	E [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]
1	255,3	348,8	36,2	203732,5	264,4	249,8
2	255,6	355,5	36,6	181473,2	275,9	254,4
3	247,3	348,5	37,2	204588,6	268,4	247

Vzorky BH2

Tab. 3.6: Mechanické vlastnosti přetvořeného (2%) vypáleného materiálu

Č. měření	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]	E [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]
1	318,9	358,5	31,5	197847,1	322,6	313
2	317,1	351,2	31,9	197100,4	321,3	312,8
3	318,7	351,7	33,3	185662,4	322,8	312,7

Vzorky BH5

Tab. 3.7: Mechanické vlastnosti přetvořeného (5%) vypáleného materiálu

Č. měření	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]	E [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]
1	347,6	353,4	27	185451,9	363	345,9
2	345,7	352,1	28,1	173124,5	360,3	341,9
3	345,4	352,3	28,2	168419,6	362,2	341,2

3.2.4 Vyhodnocení zkoušky tahem

Z naměřených hodnot se vybrala ta nejdůležitější, která je potřebná pro vyhodnocení experimentu a tou je horní mez kluzu. Všechny tři výsledky jsou zprůměrovány a uvedeny v tabulkách a grafech.

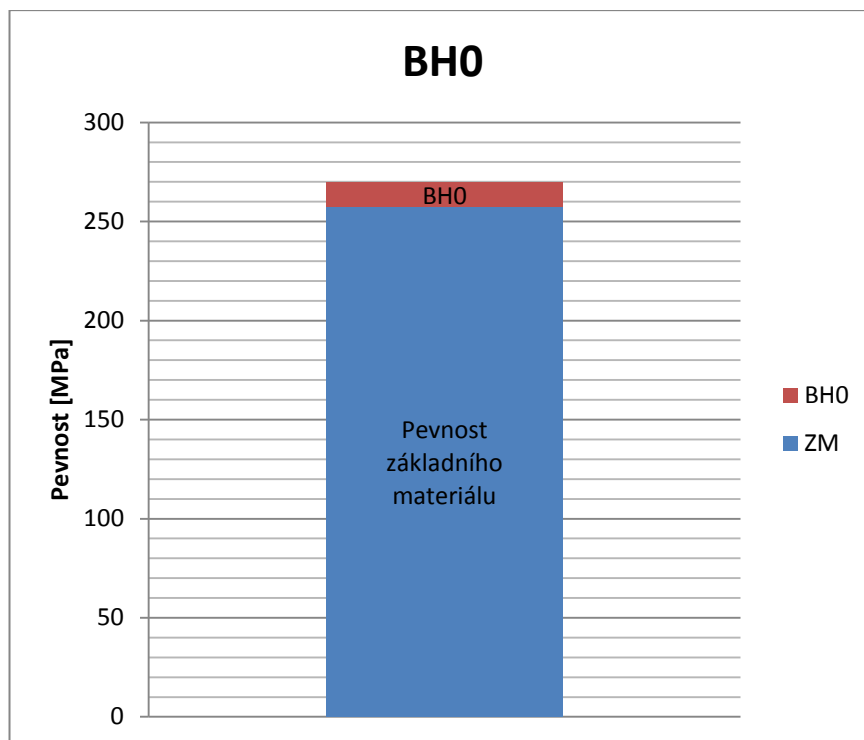
Hodnocení vzorků BH0

Pro vyhodnocení vlivu BH efektu se porovnává mez kluzu základního materiálu a materiálu, který prošel tepelným zatížením. Výsledkem je rozdíl mezi těmito hodnotami.

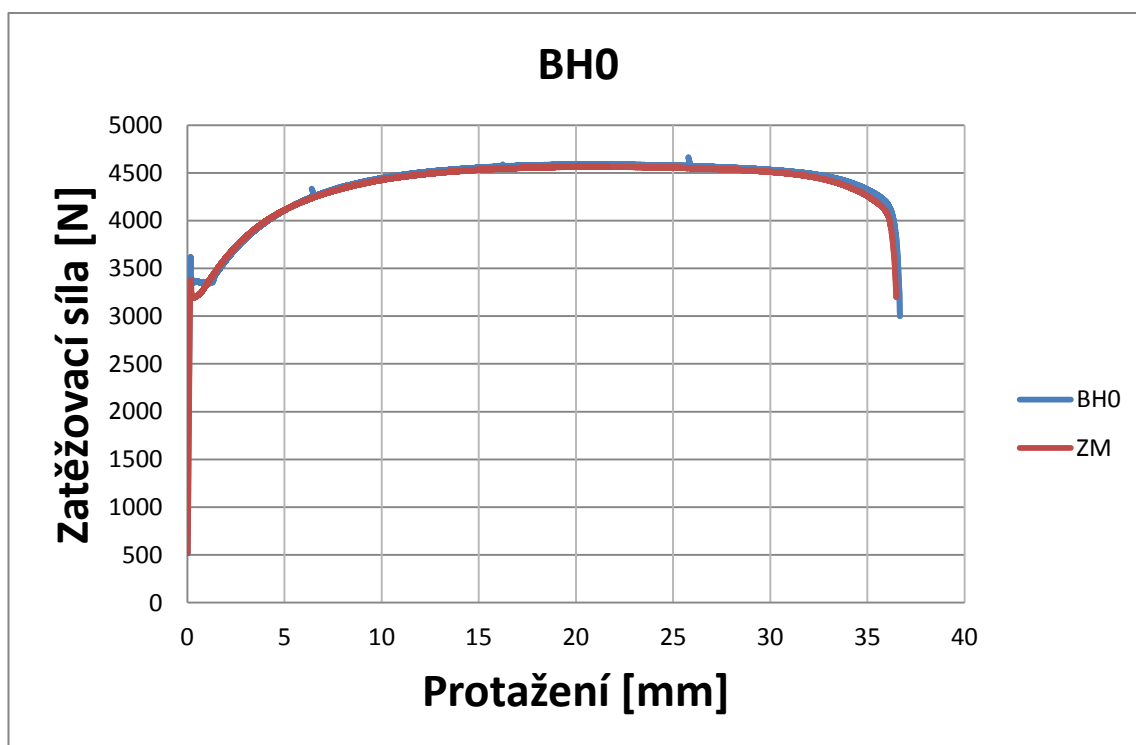
Tab. 3.8: Hodnoty vzorků při měření R_{eH} BH0, kde: ZM – základní materiál (BH0 bez toho, aniž by prošel tepelným zatížením), Vzorky BH0 - nepřetvořený vzorek, který prošel tepelným zatížením, R_{eH} – horní mez kluzu

Vzorek	ZM	Vzorky BH0
	R_{eH} [MPa]	R_{eH} [MPa]
1	256,7	264,4
2	257,5	275,9
3	258,1	268,4
průměr	257,4	269,5

Z naměřených hodnot uvedených v tabulce můžeme vypočítat, že horní mez kluzu se pohybuje v rozmezí 256,7 – 258,1 MPa, průměrná horní mez kluzu základního materiálu je 257,4 MPa. Hodnoty tepelně zatíženého materiálu bez předchozího přetvoření se pohybují v rozmezí 264,4 – 275,9 MPa a průměr je 269,5 MPa. Z toho vyplývá, že vliv BH efektu průměrně zvýší pevnost materiálu o 12,1 MPa.

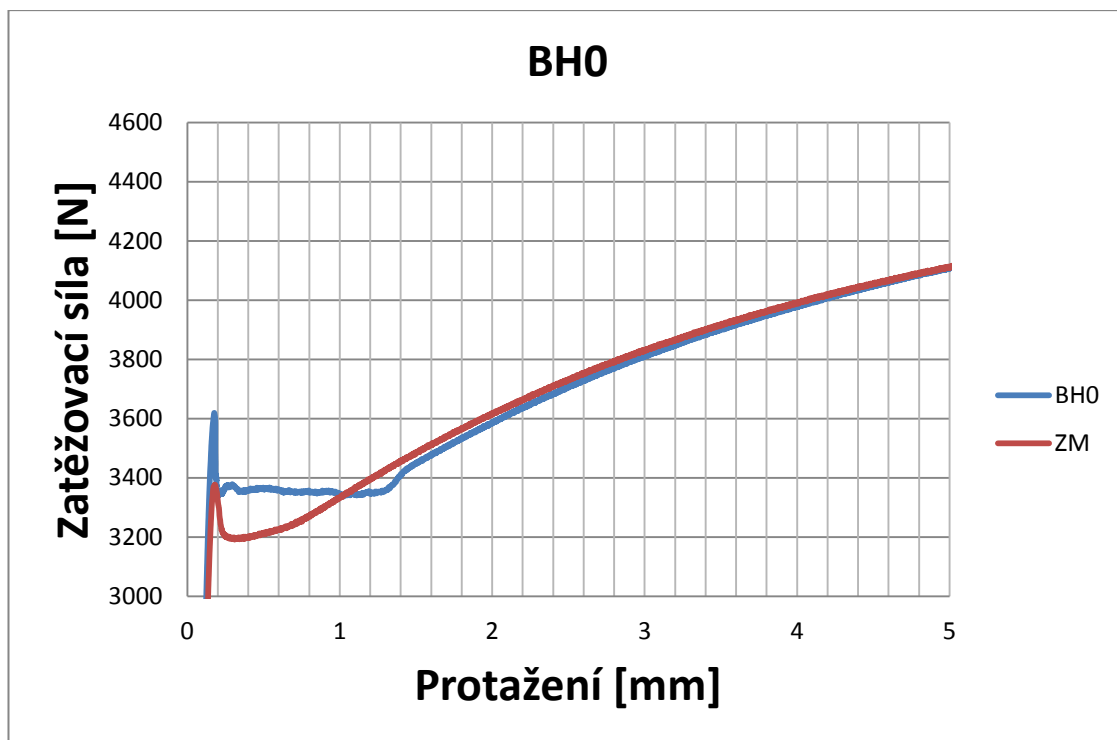


Obr. 3.8: Graf nárůstu R_{eH} u vzorku BH0



Obr. 3.9: Graf závislosti síly a protažení pro BH0

Na obrázku 3.9 jsou vidět dvě křivky, jedna pro tepelně zatížený a druhá pro nezatížený materiál. Je vidět rozdíl ve velikosti mezí kluzu. Lépe to je vidět v detailu na obrázku 3.10 na další stránce.



Obr. 3.10: Detail grafu BH0

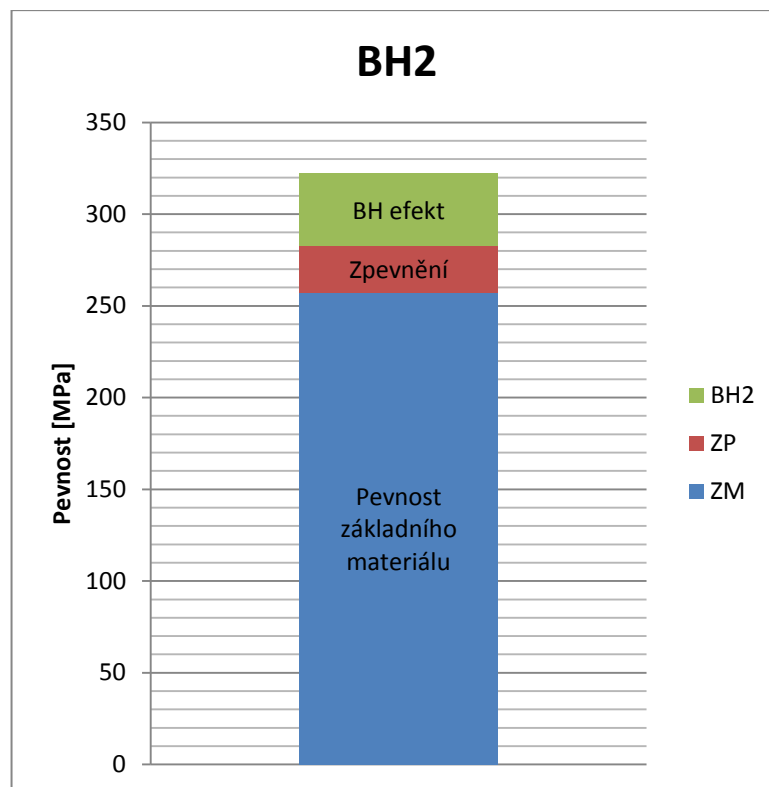
Hodnocení vzorků BH2

U vzorků BH2 je dalším parametrem zpevnění materiálu, který má velký vliv na celkové zvýšení meze kluzu. Je to hodnota, na které se zastavil stroj při přetváření o 2% (1800 μ m) a 5% (4200 μ m) v případě BH2 se průměrně jedná o 282,6 MPa

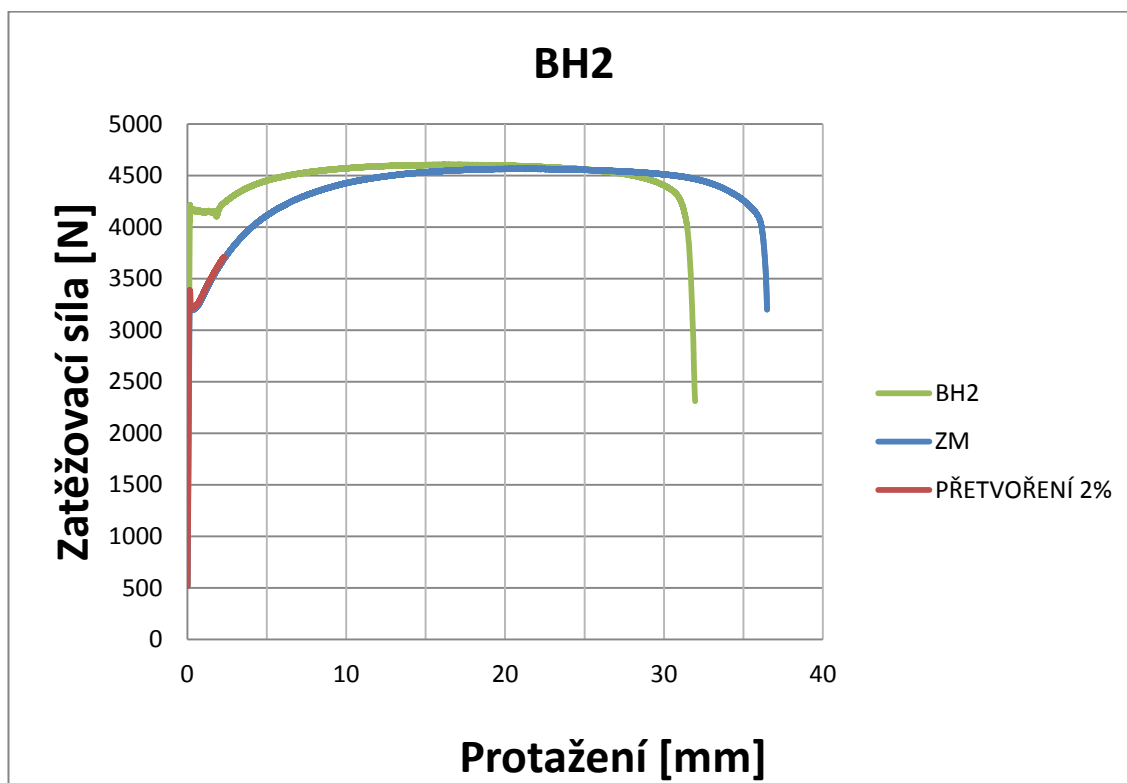
Tab. 3.9: Hodnoty vzorků při měření R_{eH} BH2

Vzorek	ZM	Přetvoření	Vzorky BH2
	R_{eH} [MPa]	R_e [MPa]	R_{eH} [MPa]
1	256,7	282,5	322,6
2	257,5	282,7	321,3
3	258,1	282,6	322,8
průměr	257,4	282,6	322,2

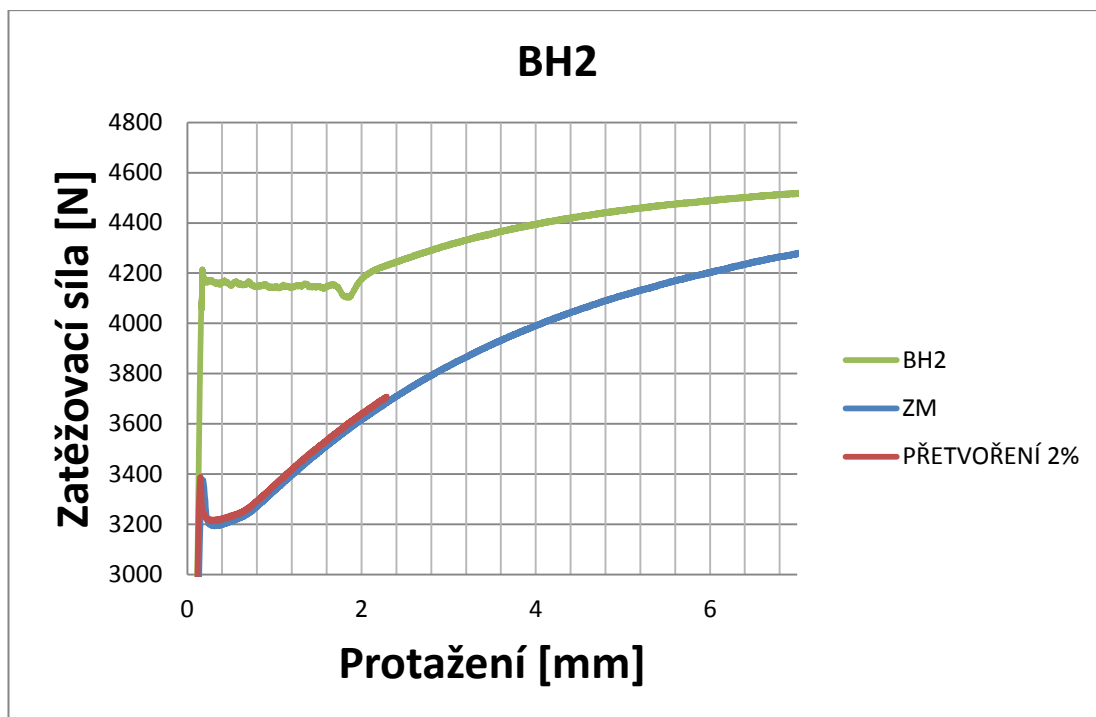
Zpevnění materiálu má podstatný vliv a pohybuje se od 24,5 MPa do 25,8 MPa a průměrná hodnota je 25,2 MPa. BH efekt je v rozmezí 38,6 – 40,2 MPa a průměr pro tyto hodnoty je 39,6 MPa, to je 15,3% R_{eH} základního materiálu. Celkově tedy vzrostla horní mez kluzu u vzorků BH2 o 64,8 MPa (25,1%).



Obr. 3.11: Graf nárůstu R_{eH} BH2



Obr. 3.12: Graf tahové zkoušky BH2



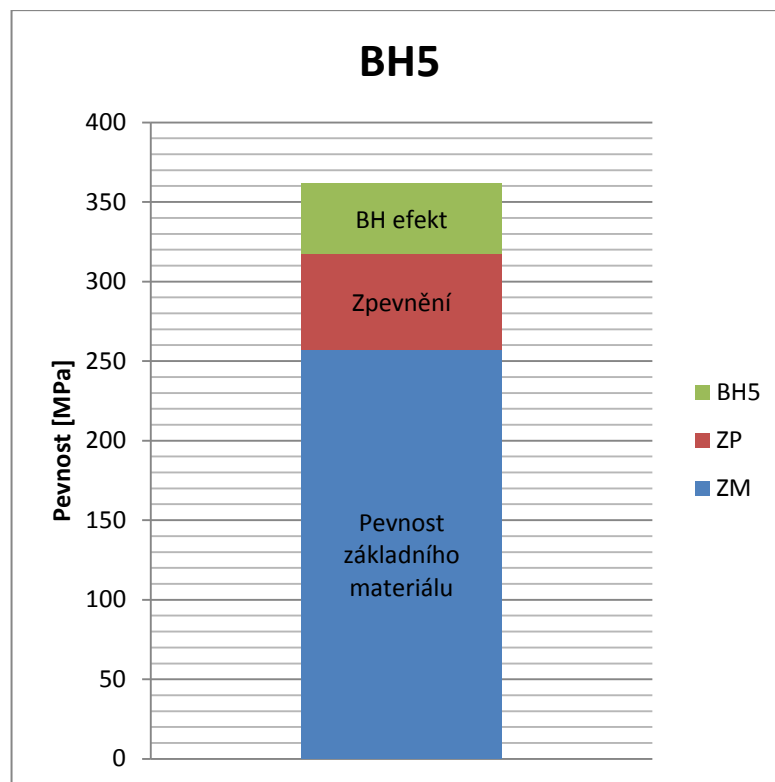
Obr. 3.13: Detail grafu BH2

Hodnocení vzorků BH5

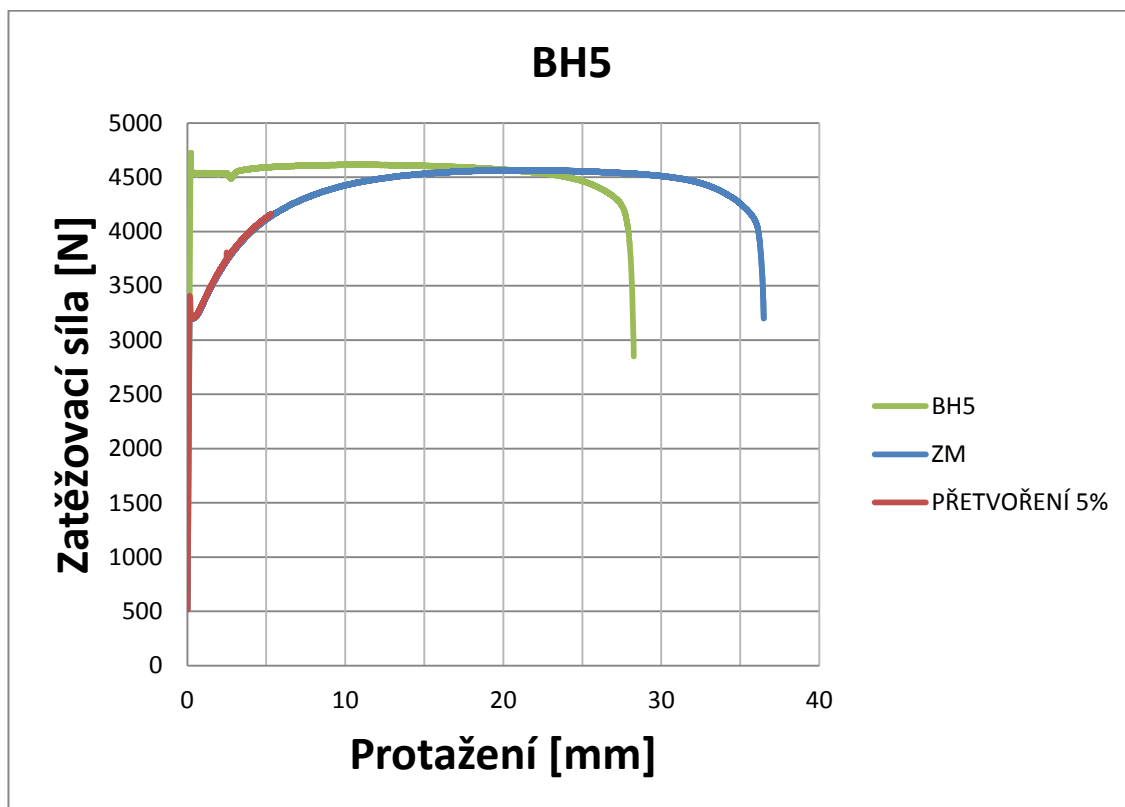
Tab. 3.10: Hodnoty vzorků při měření R_{eH} BH5

	ZM	Přetvoření	Vzorky BH5
vzorek	R_{eH} [MPa]	R_e [MPa]	R_{eH} [MPa]
1	256,7	317,5	363
2	257,5	317,2	360,3
3	258,1	317,6	362,2
průměr	257,4	317,4	361,8

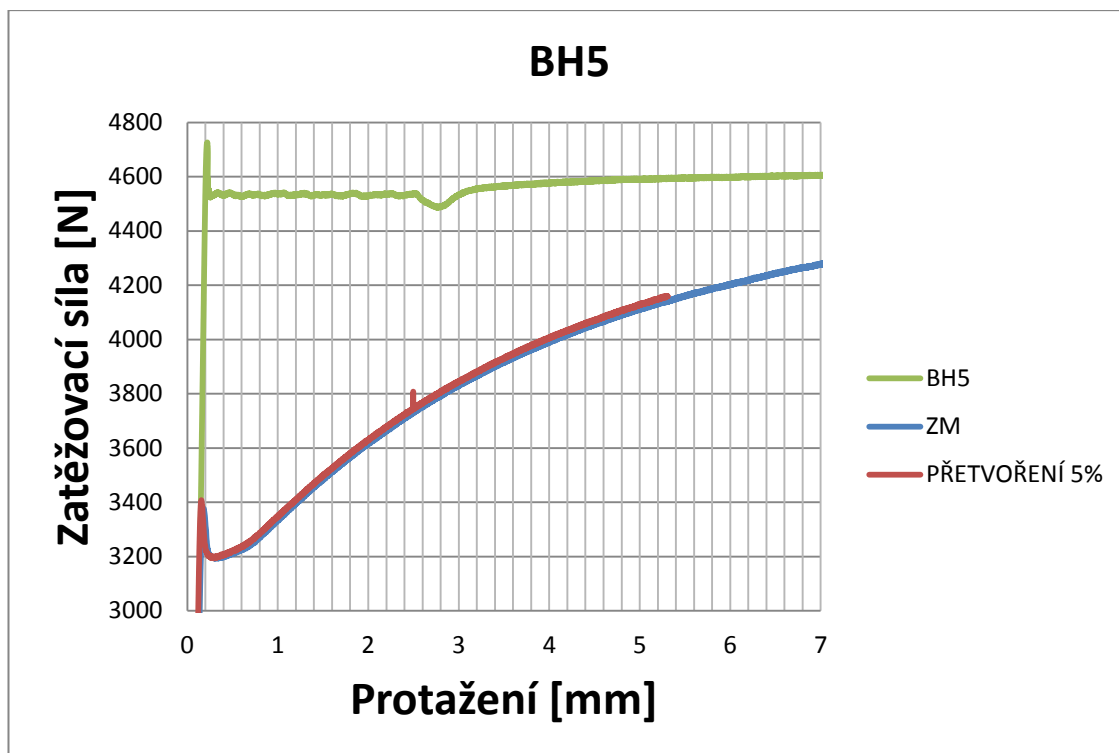
Vzorky u materiálu přetvořeného o 5% vykazují největší nárůst horní meze kluzu. BH efekt dosahuje hodnoty 43,1 – 45,5 MPa s průměrem 44,4 MPa (oproti nepřetvořenému, který vykazuje 12,1 MPa a BH2 vykazujícímu 39,4 MPa), což je 17% nárůst meze kluzu. Stejně tak, jako u vzorků BH2 i zde má podstatný vliv zpevnění materiálu. Zpevnění se pohybuje v intervalu 59,5 – 60,8 MPa a průměrná hodnota je 60 MPa. Celkové zvýšení horní meze kluzu oproti základnímu materiálu je 104,4 MPa (40,5%).



Obr. 3.14: Graf nárůstu R_{eH}



Obr. 3.15: Graf tahové zkoušky BH5



Obr. 3.16: Detail grafu BH5

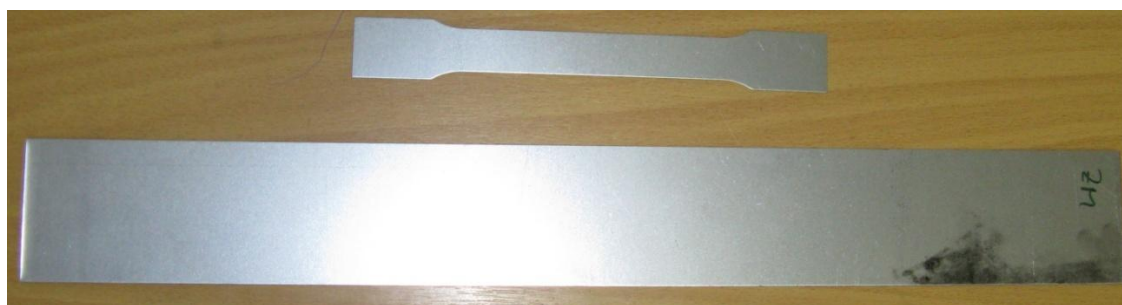
3.3 Zkouška podle Engelharta a Grosse

3.3.1 Příprava vzorků

Vzorky pro zkoušku podle Engelharta a Grosse se připravily na mechanických nůžkách s označením MS 2504. Plech o tloušťce 0,65mm se nastříhal na pásy o šířce 60 mm v počtu osmi kusů. Vzorky BH2 a BH5 se přetvořily stejně jako v případě vzorků pro tahovou zkoušku. Po jejich přetvoření se nechaly tepelně zatížit (společně se vzorky pro tahovou zkoušku) v sušárně Venticell 222.



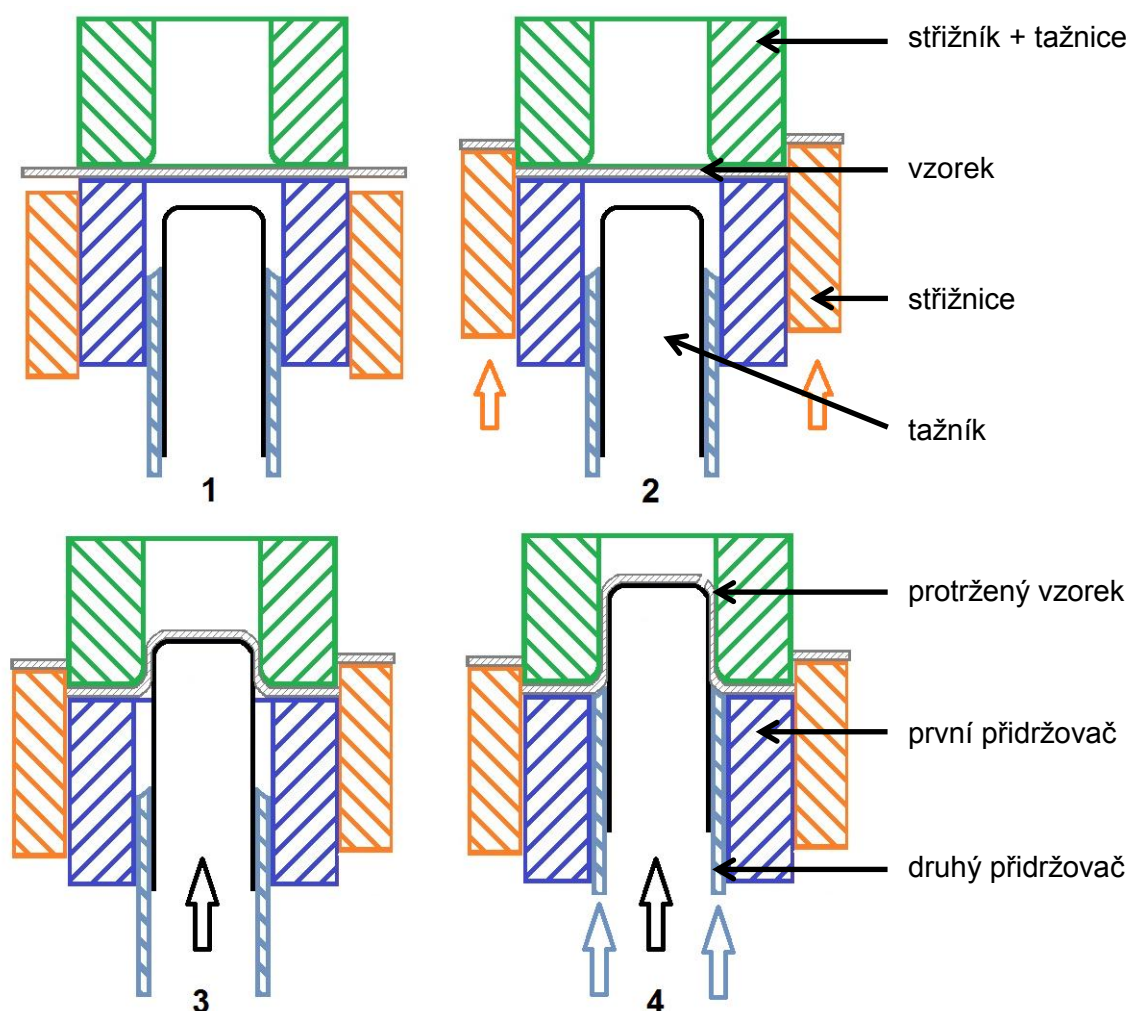
Obr. 3.17: Tabulové nůžky MS2004, od nůžek MS2504 se liší menší délkou stříhu



Obr. 3.18: Porovnání vzorků pro zkoušku tahem a zkoušku podle Engelharta a Grosse

3.3.2 Proces zkoušky podle Engelharta a Grosse

Zkouška probíhala na univerzálním zkušebním stroji tak, že nejdříve byl upnutý malý přidržovač (na obr. 3.19 – první přidržovač) a každý připravený vzorek se vložil do stroje a 5krát se změřil. Po změření základního materiálu, vzorků BH0, BH2 a BH5 se upnul velký přidržovač a celý proces se opakoval.



Obr. 3.19: Schéma práce stroje

Základní hodnotou pro vyhodnocení zkoušky je K_{\max} – maximální součinitel tažení. Ten se určí z grafu, do kterého jsou potřebné dvě proměnné. Těmi jsou tlak a součinitel tažení K .

Stroj připojený k počítači zaznamenával hodnoty tlaku v závislosti na čase. Z těchto dat se vytvořily grafy (obr. 3.21), ze kterých se určily směrodatné hodnoty tlaku potřebné pro dosazení do grafu na obr. 3.22. Další potřebnou hodnotou pro vyhodnocení zkoušky je součinitel tažení K , který se

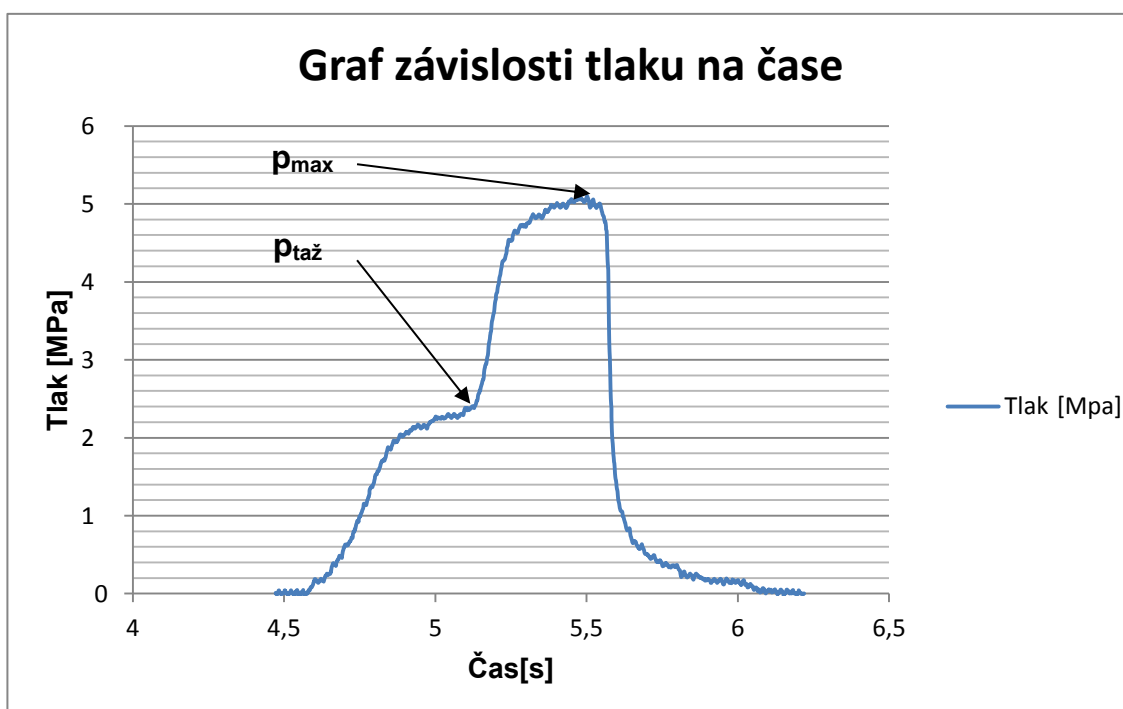
$$\text{spočítá: } K = \frac{\phi_{\text{přístřihu}}}{\phi_{\text{tažníku}}}.$$



Obr. 3.20: Vlevo vzorky zkoušené s velkým přidržovačem, napravo s malým

Určení hodnot probíhalo následujícím způsobem:

Maximální tlak p_{\max} je nejvyšší hodnota tlaku v průběhu zkoušky. Tlak $p_{\text{taž}}$ se určuje hůře, je to hodnota kdy část grafu přechází do strmější části (v tomto případě 2,4 MPa).



Obr. 3.21: Graf závislosti tlaku na čase č. měření 2 vzorku BH2

Určení součinitele tažení:

Přístřihy: -Ø 51,9mm

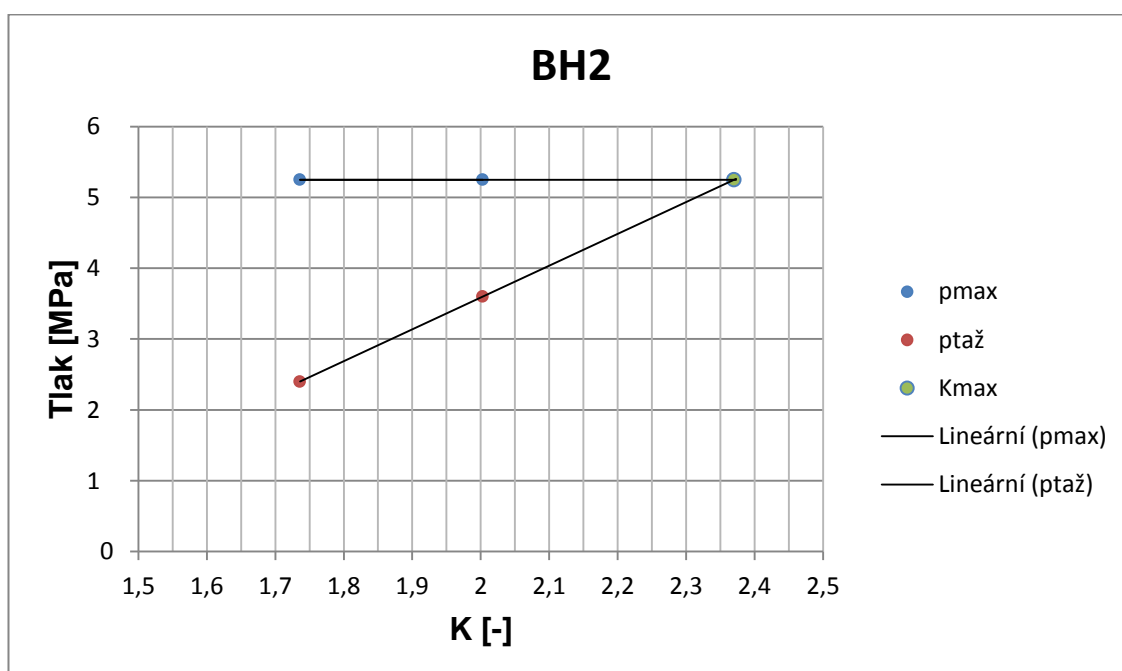
- Ø 59,9 mm

Tažník: -Ø29,9 mm

$$K_1 = \frac{\varnothing \text{ malého přístřihu}}{\varnothing \text{ tažníku}} = \frac{51,9}{29,9} = 1,735$$

$$K_2 = \frac{\varnothing \text{ velkého přístřihu}}{\varnothing \text{ tažníku}} = \frac{59,9}{29,9} = 2,003$$

Hodnoty K_1 a K_2 slouží jako souřadnice osy x, ke každému součiniteli náleží dvě hodnoty tlaků p_{\max} (průměr všech hodnot p_{\max}) a $p_{\text{taž}}$ (průměry pro malý a velký přístřih se průměrují zvlášť), jak je vidět v obr. 3.10. Hodnotami maximálních a tažných tlaků se proloží přímky, a kde se tyto přímky protnou, tam leží hodnota maximálního součinitele tažení.



Obr. 3.22: Graf závislost tlaku a součinitele tažnosti

3.3.3 Výsledky zkoušky podle Engelharta a Grosse

Při měření se použili dva druhy přístřihu a každý materiál se měřil pětkrát. Dohromady bylo čtyřicet výsledků, které se odečítaly z grafů podle uvedeného postupu v kapitole 3.3.2 a jsou uvedeny v tabulkách.

Základní materiál

Tab. 3.11: Naměřené hodnoty tlaků nepřetvořeného nevypáleného materiálu

Č. měření	malý přístřih		velký přístřih	
	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]
1	2,2	5,1	3,4	5,1
2	2,3	5,1	3,4	5,12
3	2,3	5,0	3,4	5,17
4	2,4	5,1	3,4	5,2
5	2,4	5,1	3,4	5,2

Vzorky BH0

Tab. 3.12: Naměřené hodnoty tlaků nepřetvořeného vypáleného materiálu

Č. měření	malý přístřih		velký přístřih	
	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]
1	2,3	5,1	3,5	5,19
2	2,3	5,1	3,5	5,2
3	2,3	5,1	3,5	5,2
4	2,3	5,1	3,5	5,18
5	2,4	5,1	3,5	5,2

Vzorky BH2

Tab. 3.13: Naměřené hodnoty tlaků přetvořeného (2%) vypáleného materiálu

Č. měření	malý přístřih		velký přístřih	
	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]
1	2,3	5,1	3,6	5,4
2	2,4	5,1	3,6	5,4
3	2,4	5,1	3,6	5,4
4	2,4	5,1	3,6	5,33
5	2,4	5,1	3,6	5,4

Vzorky BH5

Tab. 3.14: Naměřené hodnoty tlaků přetvořeného (5%) vypáleného materiálu

Č. měření	malý přístřih		velký přístřih	
	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]
1	2,4	5,1	3,6	5,5
2	2,4	5,1	3,6	5,5
3	2,4	5,17	3,6	5,4
4	2,4	5,1	3,6	5,35
5	2,4	5,1	3,6	5,4

3.3.4 Vyhodnocení zkoušky podle Engelharta a Grosse

Z naměřených hodnot uvedených v tabulkách byly sestrojeny grafy. Pro vyhodnocení zkoušky se porovnávala změna K_{max} – maximální stupeň tažení, který se získal postupem uvedeným v kapitole 3.3.2. Obecně by se dalo tvrdit, čím vyšší je stupeň tažení K , tím vyšší je tažnost materiálu a nižší pevnost. Tím pádem lze pozorovat změnu mechanických vlastností.

V tabulkách jsou uvedeny hodnoty p_{max} , $p_{\text{taž}}$ pro malý a velký přístřih, ze všech pěti měření. Tyto hodnoty se zprůměrují a zanesou do grafu na osu y . Na osu x se nanáší součinitel tažení K , který je závislý na průměru přístřihů. Tyto hodnoty jsou pro všechny vzorky stejné a mají hodnotu:

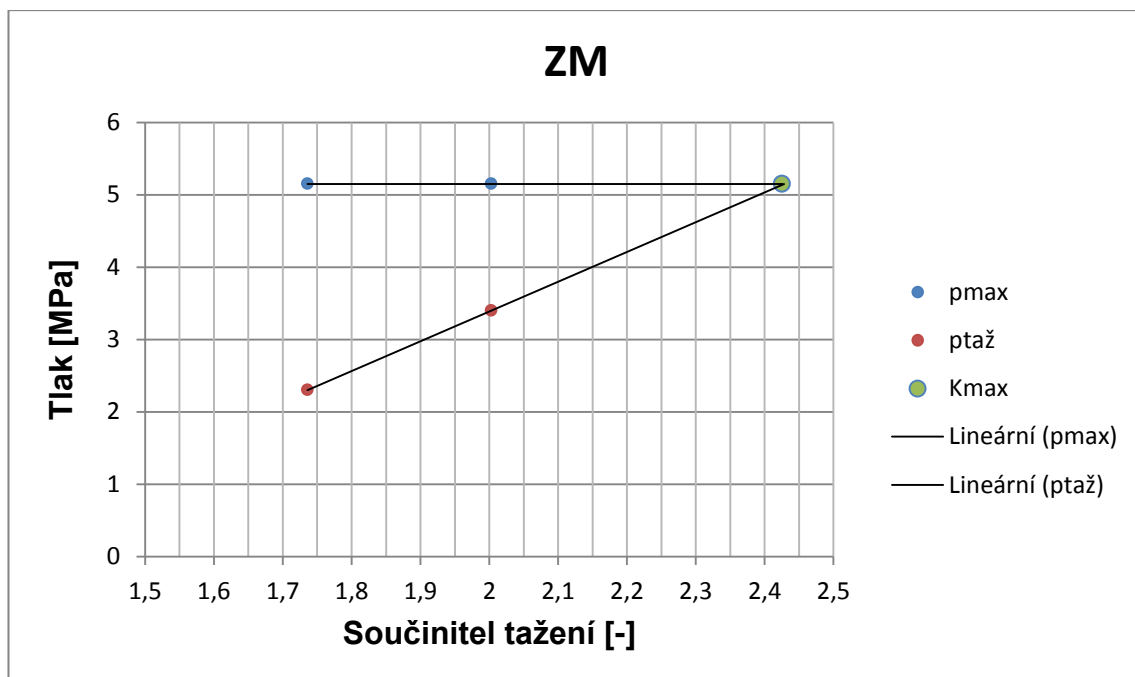
$$K_1 = \frac{\phi_{\text{přístřihu}}}{\phi_{\text{tažníku}}} = \frac{51,9}{29,9} = 1,735 \qquad K_2 = \frac{\phi_{\text{přístřihu}}}{\phi_{\text{tažníku}}} = \frac{59,9}{29,9} = 2,003$$

Základní materiál

Tab. 3.15: Naměřené hodnoty tlaků nepřetvořeného nevypáleného materiálu + průměr

Č. měření	malý přístřih		velký přístřih	
	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]
1	2,2	5,1	3,4	5,1
2	2,3	5,1	3,4	5,12
3	2,3	5,0	3,4	5,17
4	2,4	5,1	3,4	5,2
5	2,4	5,1	3,4	5,2
průměr	2,3	5,1	3,4	5,2

Hodnoty pro malý přístřih dosahují průměrné hodnoty $p_{\text{taž}} = 2,3$ MPa a $p_{\text{max}} = 5,1$ MPa. Pro velký přístřih $p_{\text{taž}} = 3,4$ MPa a $p_{\text{max}} = 5,2$ MPa Průměrná hodnota pro p_{max} je tedy 5,15 MPa.



Obr. 3.23: Graf, ze kterého se určuje K_{max}

Z grafu lze vyčíst, že největší hodnota K základního materiálu má hodnotu $K_{max} = 2,42$. S touto hodnotou se budou porovnávat výsledné maximální hodnoty součinitele tažení vzorků BH0, BH2 a BH5. Ze kterých se zkouška vyhodnotí.

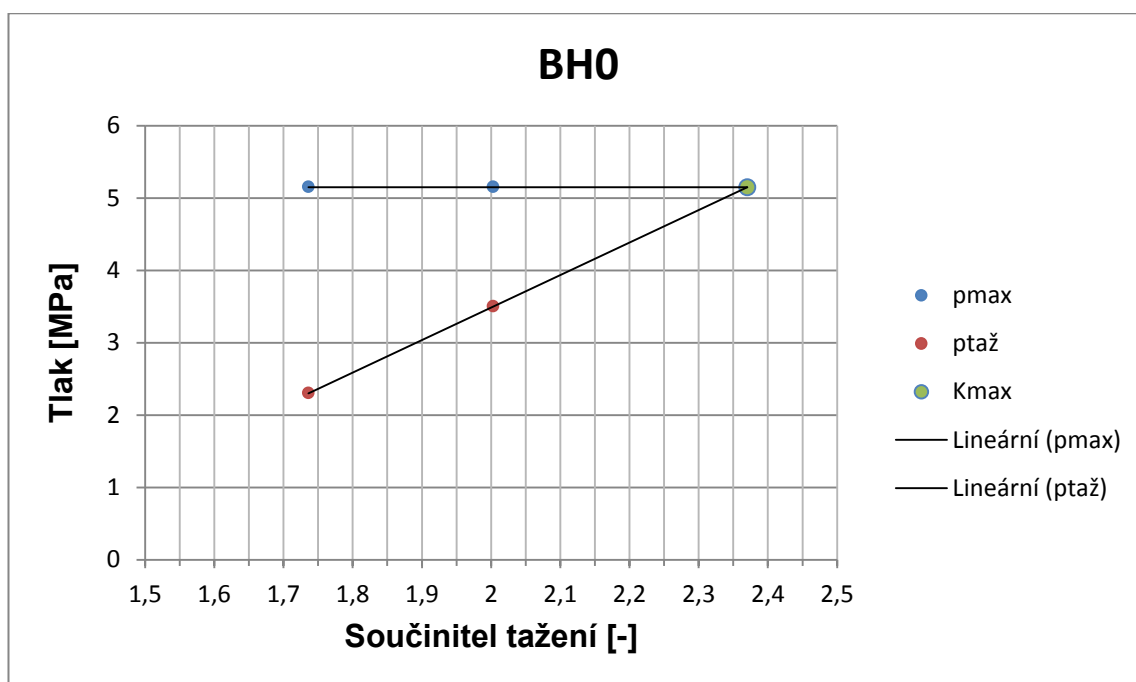
Matematicky lze spočítat hodnotu K_{max} jako průsečík přímek danými body, výsledná hodnota je $K_{max}=2,422$.

Hodnocení vzorků BH0

Tab. 3.16: Naměřené hodnoty tlaků nepřetvořeného vypáleného materiálu + průměr

Č. měření	malý přístřih		velký přístřih	
	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]
1	2,3	5,1	3,5	5,19
2	2,3	5,1	3,5	5,2
3	2,3	5,1	3,5	5,2
4	2,3	5,1	3,5	5,18
5	2,4	5,1	3,5	5,2
	2,3	5,1	3,5	5,2

Hodnoty pro malý přístřih jsou shodné s hodnotami základního materiálu. Pro velký přístřih se liší hodnota $p_{\text{taž}}$, která stoupla o 0,1 MPa. Hodnota p_{max} zůstala stejná.



Obr. 3.24: Graf BH0 závislosti součinitele K a tlaku p

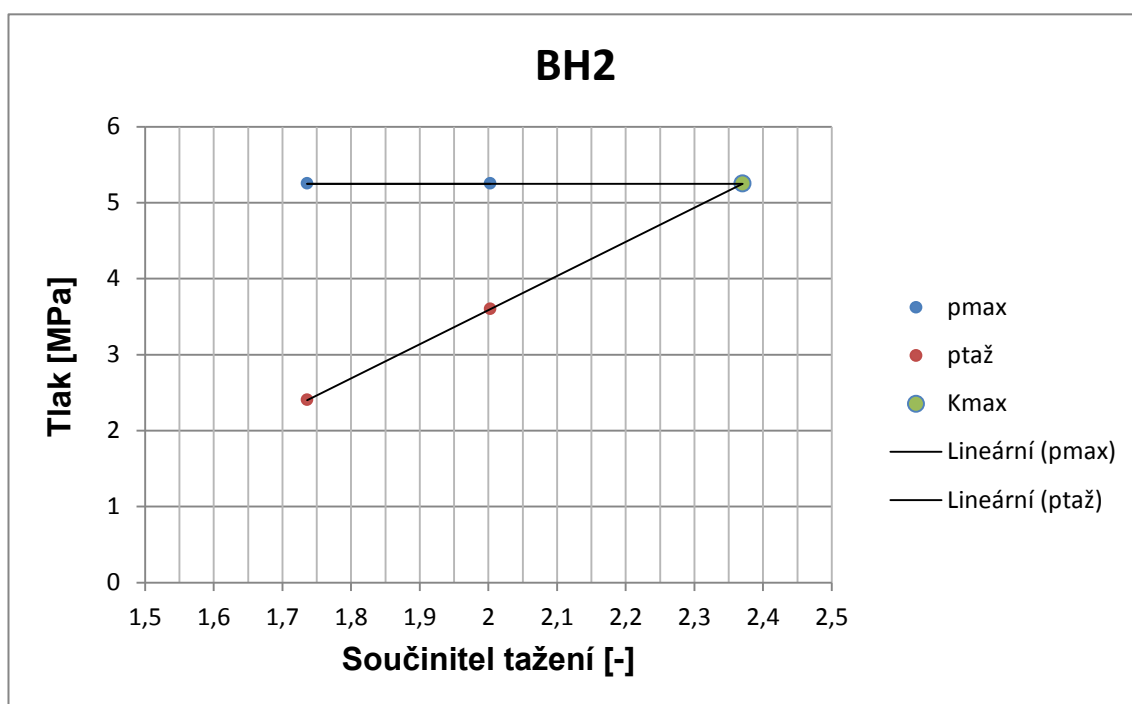
Z grafu lze vyčíst, že hodnota K_{max} tepelně zatíženého materiálu oproti základnímu materiálu, klesl a to na hodnotu 2,364. Rozdíl je 0,058.

Hodnocení vzorků BH2

Tab. 3.17: Naměřené hodnoty tlaků přetvořeného (2%) vypáleného materiálu + průměr

Č. měření	malý přístřih		velký přístřih	
	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]
1	2,3	5,1	3,6	5,4
2	2,4	5,1	3,6	5,4
3	2,4	5,1	3,6	5,4
4	2,4	5,1	3,6	5,33
5	2,4	5,1	3,6	5,4
průměr	2,4	5,1	3,6	5,4

Hodnoty pro malý přístřih jsou vyšší než hodnoty vzorků BH0 o 1 a 1,5 MPa. Pro velký přístřih se liší hodnota $p_{\text{taž}}$, která stoupla o 0,1 MPa. Hodnota p_{max} je vyšší o 0,2 MPa.



Obr. 3.25: Graf BH2 závislosti součinitele K a tlaku p

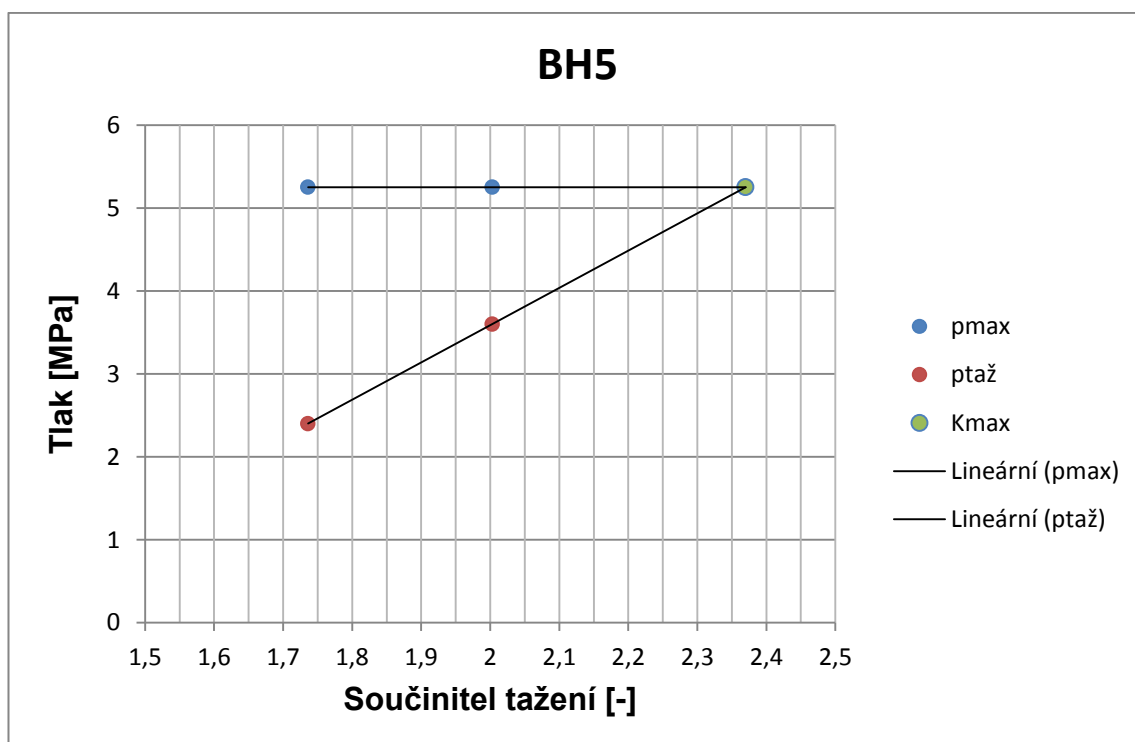
Hodnota K_{max} dosahuje hodnoty 2,364, stejně jako u BH0. Rozdíl oproti základnímu materiálu je 0,058.

Hodnocení vzorků BH5

Tab. 3.18: Naměřené hodnoty tlaků přetvořeného (5%) vypáleného materiálu + průměr

Č. měření	malý přístřih		velký přístřih	
	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]	$p_{\text{taž}}$ [MPa]	p_{max} [MPa]
1	2,4	5,1	3,6	5,5
2	2,4	5,1	3,6	5,5
3	2,4	5,17	3,6	5,4
4	2,4	5,1	3,6	5,35
5	2,4	5,1	3,6	5,4
průměr	2,4	5,1	3,6	5,4

Hodnoty jsou totožné s naměřenými hodnotami vzorků BH2, pro malý přístřih jsou vyšší než hodnoty vzorků BH0 o 1 a 1,5 MPa. Pro velký přístřih se liší hodnota $p_{\text{taž}}$, která stoupla o 0,1 MPa. Hodnota p_{max} je vyšší o 0,2 MPa.



Obr. 3.26: Graf BH5 závislosti součinitele K a tlaku p

Hodnota K_{max} dosahuje stejné hodnoty 2,364, stejně jako u BH0 a BH2. Rozdíl oproti základnímu materiálu je 0,058.

4. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat dvě metody testování BH efektu materiálu HX220BD ZF MCO. První metodou byla běžně používaná zkouška tahem a druhou metodou byla zkouška Engelharta a Grosse.

Při zkoušce tahem, dosáhla horní mez kluzu základního materiálu hodnoty 257,4 MPa, tepelné zatížení materiálu bez předchozí deformace zvýší mez kluzu o 12,1 MPa na hodnotu 269,5 MPa, tj. zvýšení o 4,7%.

U vzorků BH2 přetvořených o 2% je průměrná hodnota R_{eH} = 322,2 MPa, tj. nárůst o 64,8 MPa (25,1%). Z toho připadá 25,2 MPa na zpevnění a 39,6 na BH efekt (to se rovná 15,3% zvýšení oproti základnímu materiálu).

Vzorky BH5 deformované o 5% dosáhly nejvyšší meze kluzu. Celkově vzrostla R_{eH} o 104,4 MPa na 361,8 MPa. Z toho je 60 MPa zpevnění a 44,4 MPa (17%) odpovídá vlivu BH efektu. Celkové zvýšení meze kluzu je o 40,5%.

Podle zkoušky Engelharta a Grosse byla u základního materiálu zjištěna hodnota maximálního součinitele tažení K_{max} = 2,422. Vzorky BH0, BH2 a BH5 měly stejnou hodnotu K_{max} = 2,364, to je pokles o 2,4% oproti základnímu materiálu. Tedy po tepelném zatížení, K_{max} mírně klesl. Se změnou předchozí deformace, se zvyšuje velikost BH efektu, ale hodnota K_{max} zůstává stejná a nezávisí na velikosti přetvoření. Proto nelze BH efekt hodnotit pomocí zkoušky Engelharta a Grosse.

Tímto lze shrnout, že zkouška Engelharta a Grosse je pro měření BH efektu nevhodná. Oproti tomu se zkouška tahem je ideální pro pozorování vlivu BH efektu.

5. Seznam použité literatury

- [1] SCHMIDOVÁ E., TOMANOVIČ J.: Titanem stabilizované hlubokotažné oceli. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera. Dostupné z WWW: <http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/37122/1/LichorobiecV_Vodi_kvysokopevneoceli_ES_2010.pdf.pdf>
- [2] MAZANCOVÁ E.: Technické materiály I. – kovové materiály. 1.vydání Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. 151 s. ISBN 978-80-248-2577-9
- [3] Wwww.worldautosteel.org [online]. 2009 [cit. 2011-03-28]. Advancedhighstrengthsteel (AHSS) applicationguidelines. Dostupné z WWW: <<http://www.worldautosteel.org/uploaded/AHSS%20Application%20Guidelines%204-1%20June%202009.pdf>>
- [4] WOJCIK R.. Porovnání ocelí a technologií při výrobě automobilové karoserie. Brno: Fakulta strojního inženýrství, 2011. 32 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Dostupné z WWW: <http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/37122/1/LichorobiecV_Vodikvysokopevneoceli_ES_2010.pdf.pdf>
- [5] VÁLEK L., PACHLOPNÍK R., MOKROŠ L.: Zavádění výroby brám mikrolegovaných ocelí v Mittal Steel Ostrava a.s. Dostupné z WWW: <http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_05/papers/175.pdf>
- [6] SOLFRONK P. Teorie a technologie zpracování plechů: Přednáška 1: Materiály pro stavbu karoserie automobilu. Technická univerzita v Liberci Fakulta strojní, katedra strojírenské technologie Dostupné z WWW: <http://ksp.tul.cz/KSP_TZP_PR_01_CZE_Solfronk_Materialy_pro_stavbu_karoserie_automobilu.pdf>
- [7] DIN EN 10346:2009-07 (DX, HX) - Continuously hot-dip coated steel flat products
- [8] EN ISO 6982-1 Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty
- [9] HAMERNÍK J.: Mechanické vlastnosti a jejich zkoušení. Dostupné online z WWW: <<http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>>
- [10] DRIML B.: Metody zkoušení mechanických vlastností materiálu – Základní vlastnosti materiálu a jejich zkoušení. Univerzita Palackého v Olomouci. Dostupné z WWW: <http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf>

[11] DVOŘÁK M., GAJDOŠ F, NOVOTNÝ K. Technologie tváření. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2003. ISBN 80-214-2340-4

[12] Nauka o materiálu – mechanické zkoušky. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z WWW:
< <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>>

[13] Analytické a experimentálne metódy predikcie ukazovateľov lisovateľnosti tenkých plechov. Centrum technologickej plastometrie. Katedra Aplikovanej Mechaniky. Strojnícka Fakulta, Žilinská univerzita v Žiline Dostupné z WWW: <http://fstroj.uniza.sk/web/kame/index_html_files/Predikcia%20ukazovate%C4%BEOv%20lisovate%C4%BEosti%20-%20ponukov%C3%BD%20list.pptx>

6. Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obr. 2.1: *Oceli používané v automobilovém průmyslu*

Obr. 2.2: *Proces pohybu uhlíku BH efektu*

Obr. 2.3: *Nárůst meze kluzu během procesu zpracování BH oceli*

Obr. 2.4: *Základní tvary zkušebních tyčí*

Obr. 2.5: *Rozdíl mezi smluvním a skutečným napětím*

Obr. 2.6: *Graf zkoušky houževnaté oceli*

Obr. 2.7: *Určení meze pružnosti $R_{p0,005}$*

Obr. 2.8: *Určení meze pružnosti $R_{p0,02}$*

Obr. 2.9: *Křivky různých materiálů*

Obr. 2.10: *Graf závislosti tlaku na čase*

Obr. 2.11: *Graf závislosti tlaku a součinitele K*

Obr. 2.12: *Zkušební stroj v laboratořích*

Obr. 2.13: *1 – střížník + tažnice, 2 – vzorek, 3 – střížnice, 4 – první přídržovač, 5 – tažník, 6 – druhý přídržovač*

Obr. 3.1: *Porovnání délky vzorků pro tahovou zkoušku po přetvoření (ZM, BH2, BH5)*

Obr. 3.2: *Sušárna Venticell 222*

Obr. 3.3: *Digitální úchylkoměr MITUTOYO*

- Obr. 3.4 : Zkušební stroj TIRAtest 2300
- Obr. 3.5: Pracovní prostředí programu LabNET. TahTlak – nalevo jsou protokolové hodnoty, uprostřed aktuální graf zobrazující průběh zkoušky, napravo tlačítka ovládající zkušební stroj
- Obr. 3.6: Základní vzorek a přetrhané vzorky
- Obr. 3.7: Grafické znázornění určování vlivu BH efektu a zpevnění
- Obr. 3.8: Graf nárůstu R_{eH} u vzorku BH0
- Obr. 3.9: Graf závislosti síly a protažení pro BH0
- Obr. 3.10: Detail grafu BH0
- Obr. 3.11: Graf nárůstu R_{eH} BH2
- Obr. 3.12: Graf tahové zkoušky BH2
- Obr. 3.13: Detail grafu BH2
- Obr. 3.14: Graf nárůstu R_{eH} BH5
- Obr. 3.15: Graf tahové zkoušky BH5
- Obr. 3.16: Detail grafu BH5
- Obr. 3.17: Tabulové nůžky MS2004, od nůžek MS2504 se liší menší délkou stříhu
- Obr. 3.18: Porovnání vzorků pro zkoušku tahem a zkoušku podle Engelhart a Grosse
- Obr. 3.19: Schéma práce stroje
- Obr. 3.20: Vlevo vzorky zkoušené s velkým přidržovačem, napravo s malým
- Obr. 3.21: Graf závislosti tlaku na čase č. měření 2 vzorku BH2
- Obr. 3.22: Graf závislost tlaku a součinitele tažnosti
- Obr. 3.23: Graf, ze kterého se určuje K_{max}
- Obr. 3.24: Graf BH0 závislosti součinitele K a tlaku p
- Obr. 3.25: Graf BH2 závislosti součinitele K a tlaku p
- Obr. 3.26: Graf BH5 závislosti součinitele K a tlaku p

- Tab. 3.1: Chemické složení testovaného materiálu
- Tab. 3.2: Udávané mechanické vlastnosti testovaného materiálu
- Tab. 3.3: Průměrné rozměry sad vzorků
- Tab. 3.4: Mechanické vlastnosti nepřetvořeného nevypáleného materiálu
- Tab. 3.5: Mechanické vlastnosti nepřetvořeného vypáleného materiálu
- Tab. 3.6: Mechanické vlastnosti přetvořeného (2%) vypáleného materiálu
- Tab. 3.7: Mechanické vlastnosti přetvořeného (5%) vypáleného materiálu
- Tab. 3.8: Hodnoty vzorků při měření R_{eH} BH0
- Tab. 3.9: Hodnoty vzorků při měření R_{eH} BH2
- Tab. 3.10: Hodnoty vzorků při měření R_{eH} BH5
- Tab. 3.11: Naměřené hodnoty tlaků nepřetvořeného nevypáleného materiálu
- Tab. 3.12: Naměřené hodnoty tlaků nepřetvořeného vypáleného materiálu
- Tab. 3.13: Naměřené hodnoty tlaků přetvořeného (2%) vypáleného materiálu
- Tab. 3.14: Naměřené hodnoty tlaků přetvořeného (5%) vypáleného materiálu
- Tab. 3.15: Naměřené hodnoty tlaků nepřetvořeného nevypáleného materiálu + průměr
- Tab. 3.16: Naměřené hodnoty tlaků nepřetvořeného vypáleného materiálu + průměr
- Tab. 3.17: Naměřené hodnoty tlaků přetvořeného (2%) vypáleného materiálu + průměr
- Tab. 3.18: Naměřené hodnoty tlaků přetvořeného (5%) vypáleného materiálu + průměr

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na tvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Datum 24. 5. 2013

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

Date 24. 5. 2013

Signature